



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LAS FIBRAS METÁLICAS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO, MEDIANTE LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (UPV)

Por:

INGENIERO CIVIL MIGUEL ÁNGEL OSPINA GARCÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE ARTES

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

BOGOTÁ D.C.

2016

**ESTIMACIÓN DEL EFECTO DE LAS FIBRAS METÁLICAS SOBRE LA
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE CONCRETO, MEDIANTE
LA TÉCNICA DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO (UPV)**

Por:

Ingeniero Civil Miguel Ángel Ospina García

Código: 2592335

Documento de tesis para optar al título de Magister en Construcción

Director:

I.C. Andrés Salas Montoya Ph.D.

Codirector:

I.C. Juan Manuel Lizarazo Ph.D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE ARTES

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

BOGOTÁ D.C.

2016

DEDICATORIA



***Cada día de mi existencia me convenzo
que la vida no es de coincidencias si no
de causalidades, en esta maestría
conocí a la madre de mi hija y éste
esfuerzo se lo dedico a ellas.***

Agradecimientos

El autor de éste trabajo agradece a las siguientes personas por su apoyo en el desarrollo de éste trabajo:

Al Ingeniero y profesor Juan Manuel Lizarazo por sus grandes aportes, conocimientos y acompañamiento constante en el desarrollo de éste trabajo.

Al Ingeniero y profesor Andrés Salas Montoya por su apoyo incondicional y aporte de conocimientos en el desarrollo de éste proyecto.

A la Arquitecta y profesora Martha Luz Salcedo por el apoyo en el desarrollo de éste proyecto.

Al técnico Dario Moreno por su colaboración en la realización de los ensayos de Laboratorio.

Al técnico Oliverio Pinzón Arévalo por la ayuda brindada en la elaboración de las probetas de ensayo.

A los profesores de la Maestría en Construcción por brindarme nuevos conocimientos y adicionalmente despertar más el cariño hacia la investigación.

RESUMEN

En este trabajo se analizó el comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de acero, sometido ante esfuerzos de flexión, tensión y compresión, para obtener su resistencia mecánica, su tenacidad y la evolución del daño en los elementos evaluados; a su vez se midió la velocidad de pulso ultrasónico propagada, en simultáneo con la medición de los esfuerzos mecánicos con la finalidad de obtener una correlación entre esta velocidad y los parámetros anteriormente descritos. Para llevar a cabo estos objetivos se realizaron 24 ensayos de laboratorio medidos en 3 tipos de mezclas de concreto, variando la cantidad de fibras de refuerzo por metro cubico de concreto; estos contenidos fueron de 0 kg/m³, 25 kg/m³ y 70 kg/m³. Adicionalmente se generaron modelos matemáticos que permiten comprender, analizar y correlacionar la resistencia mecánica, la tenacidad y la evolución del daño en las mezclas de concreto mediante la medición de la velocidad de pulso ultrasónico en un elemento evaluado.

Palabras Clave: Velocidad de pulso ultrasónico, evolución del daño, tenacidad, esfuerzos mecánicos.

ABSTRACT

In this work the mechanical behavior of reinforced concrete with steel fibers subjected to bending stress, tension and compression was evaluated, obtaining the mechanical resistance, toughness and the evolution of damage in the elements assessed. In turn the propagated ultrasonic pulse velocity was evaluated simultaneously with the measurement of the mechanical stresses, in order to obtain a correlation between ultrasonic pulse velocity and parameters above described. For which, 24 laboratory tests were made, measured in three types of concrete mixtures, varying the amount of reinforcing fibers per cubic meter of concrete; these contents were 0 kg/m³, 25 kg/m³ and 70 kg/m³. Mathematical models were generated in order to understand, analyze and correlate the mechanical resistance, toughness and the evolution of damage in similar mixtures by means of measuring the ultrasonic pulse velocity in an assessed element.

Keywords: ultrasonic pulse velocity, damage evolution, toughness, mechanical stress.

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo General.....	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	COMPONENTES DE LA INVESTIGACIÓN	17
3.1	Planteamiento del problema	17
4	MARCO TEORICO	19
4.1	Desempeño del Concreto	20
4.1.1	Fibras en el Concreto	21
4.1.2	Tipo de Fibras	21
4.1.3	Recomendaciones para el uso de las Fibras	25
4.2	Durabilidad en el Concreto	29
4.3	Leyes constitutivas en esfuerzos uniaxiales a tensión	40
4.3.1	Modelo rígido plástico	41
4.3.2	Modelo lineal post-fisuramiento	43
4.4	Daño mecánico.....	43
4.4.1	Causas del Daño en el Concreto.....	44
4.4.2	Daño crítico y fractura	45
4.5	Ensayos no destructivos	46
5	METODOLOGÍA.....	54
5.1	PRIMERA FASE	55
5.1.1	Cemento	55
5.1.2	Agregados.....	56
5.2	SEGUNDA FASE.....	58
5.2.1	Diseño de mezcla de concreto	58
5.2.2	Cálculo de las cantidades optimas de fibras de acero para reforzar el concreto	64
5.2.3	Cálculo de elementos a fabricar	68
5.2.4	Producción de las mezclas en estado fresco.....	71
5.3	TERCERA FASE	73
5.3.1	Diseño de equipos de sujeción:.....	74
5.3.2	Calibración de equipos.....	76
5.3.3	Ejecución de ensayos.	80
5.3.4	Ensayos a Flexión.....	81
5.3.5	Ensayos A Tensión	90
5.3.6	Ensayos a compresión simple.....	92
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	95
6.1	Comportamiento mecánico	95
6.1.1	Tenacidad	101
6.1.2	Evaluación de la resistencia pos-falla.....	104
6.2	Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico en las mezclas SFRC.	105
6.2.1	Correlación UPV versus esfuerzo a la flexión del elemento	106
6.2.2	Medición UPV con respecto a parámetro P/Pu.....	110
6.3	Evaluación del daño:	113

7	CONCLUSIONES	116
8	RECOMENDACIONES.....	119
9	BIBLIOGRAFÍA	120
10	APÉNDICES	123

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de arte con el Concreto.	19
Figura 2. Detalle de refuerzo de una columna.	20
Figura 3. Detalle de las Fibras de polipropileno	22
Figura 4. Detalle de las Fibras de vidrio.	22
Figura 5. Uso de las fibras de polipropileno, en la actualidad se emplea como refuerzo secundario.	23
Figura 6. Amplia deformación en una viga de concreto.	23
Figura 7. Formas de sección que pueden tener las fibras de acero.	24
Figura 8. Forma geométricas de las fibras de acero.	24
Figura 9. Ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión de la mezcla SFRC. Tomado de F. Ksai et al. / Construction and Building Materials página 3 (2008)	33
Figura 10. Detalle de fibras de acero, tamaño y forma vista real.	36
Figura 11. Vista en planta de los paneles fabricados. Figura 12. Apoyo de paneles y tipo de carga aplicado.	37
Figura 13. Esquema de falla del panel en concreto SRC	38
Figura 14. Gráfica de resistencia a la compresión versus UPV para los 6 tipos de agregados evaluados.	49
Figura 15. Gráficas de la resistencia a la compresión versus la relación a/mc.	50
Figura 16. a. Diagrama de Pareto estandarizado en la porosidad b. Comportamiento de la porosidad en función de la relación a/mc para los respectivos días de curado	51
Figura 17, a. gráfica de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico versus relación agua cementante. b. Gráfica de la resistencia a la compresión versus porosidad del concreto.	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Comportamiento de propiedades mecánicas sometidas normalmente al concreto.	27
Tabla 2. Recomendaciones del comité ACI 544 para el diseño y elaboración de elementos en concreto.	28
Tabla 3. Descripción de Acciones químicas o mecánicas que afectan al concreto.	29
Tabla 4. Características de las fibras de acero.	32
Tabla 5. Tipos de mezcla y resultados obtenidos.	33
Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos en la caracterización del cemento a emplear en el proyecto.	55
Tabla 7. Tabla resumen de los resultados obtenidos para el Agregado grueso.	56
Tabla 8. Tabla resumen de los resultados obtenidos para el Agregado fino.	56
Tabla 9 Criterios escogidos para el diseño de la mezcla de concreto.	59
Tabla 10. Dosificaciones de cantidades de material para 1 m ³ de concreto.	63
Tabla 11. Datos técnicos de las fibras Sikafiber FE-530/35 GH.	66
Tabla 12. Resistencias esperadas para las diferentes mezclas de concreto realizadas en éste trabajo.	67
Tabla 13. Cantidad de volúmenes a fundir.	70
Tabla 14. Dosificaciones de materiales para la mezcla de concreto a realizar.	70
Tabla 15. Resultados obtenidos en la realización de la mezcla de concreto en estado fresco.	71
Tabla 16. Ajuste de equipo LDT con respecto al tornillo micrométrico.	77
Tabla 17. Resultados obtenidos en prueba piloto al Concreto SFRC.	79
Tabla 18. Parte uno del compilado de resultados de medición UPV para concreto con SFRC 0 kg/m ³ .	82
Tabla 19. Resultados compilados obtenidos para las mezclas SFRC 25 kg/m ³ .	85
Tabla 20. Parte uno del compilado de resultados de medición UPV para Concreto con SFRC 70 kg/m ³ .	87
Tabla 21. Tabla de resultados de ensayo a compresión para mezcla SFRC 0, 25 y 70 kg/m ³ .	93
Tabla 22. Resumen de resultados promedios obtenidos en la tesis de grado.	99
Tabla 23. Resumen de los datos obtenidos para medición de la tenacidad.	103
Tabla 24. Resumen de las ecuaciones obtenidas.	109
Tabla 25. Ecuaciones obtenidas de la gráfica de daño versus velocidad de pulso ultrasónico.	115

Listas de gráficas

Gráfica 1. Esfuerzo vs deformación del Concreto Reforzado con Fibras de Acero sometido a compresión con diferentes contenidos de fibras ¹⁸ .	26
Gráfica 2. Curvas de cargas vs deformación a flexión para varios Concretos variando el tipo de fibras (relación l/d).	26
Gráfica 3. Resumen visuales obtenidos en la investigación.	35
Gráfica 4. Resultados del proyecto de Yining y Wolfgang a una edad de 48 h.	38
Gráfica 5. Gráfica del comportamiento del concreto SFRC, resistencia a la compresión a la derecha y resistencia a la tensión a la izquierda.	39
Gráfica 6. Diagrama del comportamiento a tensión de mezclas SFRC, en el eje x es la deformación unitaria del material y en el eje y el esfuerzo mecánico sometido al mismo.	41
Gráfica 7. Modelos simplificados de a. Esfuerzo último a tensión de forma uniaxial (f_{FTU}); b. Esfuerzo a tensión (f_{FTS}) en el comportamiento elástico de un material; c. f_{FTU} en un modelo lineal.	42
Gráfica 8. A. Resultados típicos en un material rígido plástico; b. Linealización del comportamiento plástico de la gráfica.	42
Gráfica 9. Interpretación de módulos elásticos.	45
Gráfica 10. Diagramación de resultados en la comparación de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia del Concreto.	47
Gráfica 11. Curva granulométrica del agregado grueso empleado en el trabajo, comparado con las especificaciones dadas por la norma NTC 174.	57
Gráfica 12. Curva granulométrica del agregado fino empleado en el trabajo, comparado con las especificaciones dadas por la norma NTC 174.	57
Gráfica 13. Correlación para determinar la relación A/mc.	61
Gráfica 14. Orden de ejecución de ensayos.	80
Gráfica 15. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 0 kg/m ³ .	84
Gráfica 16. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 25 kg/m ³ .	87
Gráfica 17. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 70 kg/m ³ .	90
Gráfica 18. Gráficos obtenidos de los ensayos de tensión indirecta.	92
Gráfica 23. Gráfico resumen y comparativo de los resultados obtenidos para las tres mezclas SFRC del concreto.	96
Gráfica 24. Diagrama esfuerzo vs deflexión de las mezclas SFRC interpoladas de manera lineal.	97
Gráfica 21. Valores obtenidos de resistencia del elemento luego de la falla para cada mezcla SFRC.	104
Gráfica 22. Datos obtenidos de la medición de la velocidad del pulso ultra sónico, a. sin depurar. b. depurados.	106
Gráfica 23. Líneas de tendencia de los datos.	108

Gráfica 24. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la carga.	111
Gráfica 25. Linealización de la gráfica UPV vrs P/Pu.	112
Gráfica 26. Gráfica daño versus velocidad de propagación en m/s en las mezclas SFRC.	114
Gráfica 27. Regresiones lineales a los datos obtenidos de Daño versus velocidad de propagación.	114

Listas de Imágenes

Imagen 1. Causas del deterioro y daño del Concreto; a la izquierda elementos con deterioro por Sulfatos, a la derecha elementos deteriorados por reacción álcali-agregado.	44
Imagen 2. Resumen de registro fotográfico de los ensayos de caracterización física y mecánica de los materiales que intervienen en la mezcla SFRC; a. Mezcla SFRC en estado fresco; b. Prueba de asentamiento; c. Ensayo de tensión indirecta con sistema de sujeción del palpador; d. ensayo de compresión simple; e. Ensayo de flexión y muestra de equipo de adquisición de datos; f. fibras de acero empleadas.	54
Imagen 3. Mezcla de concreto en estado fresco.	58
Imagen 4. Esquema de la viga a fabricar para la realización de los ensayos propuestos.	68
Imagen 5. Sistema para medición de la deformación en vigas de Concreto.	69
Imagen 6. Cilindro de concreto.	69
Imagen 7. Registro fotográfico de las actividades para el aseguramiento de la calidad del Concreto.	72
Imagen 8. Registro fotográfico de los elementos fundidos en Concreto.	73
Imagen 9. Diseño del sistema para la medición de la deformación en vigas de concreto de 15 cm x 15 cm x 60 cm.	74
Imagen 10. Esquema para el montaje del Generado y Receptor del equipo Pund It.	75
Imagen 11. Diseño de equipo de sujeción para generador y transductor del equipo Pund It.	76
Imagen 12. Tornillo micrométrico digital para ajuste de LDT.	76
Imagen 13. Prensa para concreto marca Controls modelo MC 8, con marcos a flexión y compresión.	78
Imagen 14. Imágenes de prueba piloto sobre viga SFRC de contenido incierto, nótese el equipo de sujeción ya fabricado.	78
Imagen 15. Registro fotográfico de la ejecución de ensayos a flexión del concreto.	81
Imagen 16. Resumen fotográfico de los ensayos realizados al concreto con 0 kg/m ³ ,	83
Imagen 17. Resumen fotográfico de los ensayos de las mezclas SFRC 25 kg/m ³	86
Imagen 18. Resumen fotográfico de los ensayos a las mezclas SFRC 70 kg/m ³	89
Imagen 19. Resumen fotográfico de los ensayos realizados a tensión indirecta.	91
Imagen 21. Resumen gráfico de las actividades realizadas a la mezcla SFRC.	95
Imagen 21. Imágenes de los ensayos realizados a tensión indirecta a los diferentes tipos de mezcla.	99
Imagen 22. Prueba de resistencia pos-falla.	104
Imagen 24. Recorrido por la Onda sonora en las vigas SFRC	107

1 INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción, lo cual ha fomentado en los últimos años nuevas tecnologías para optimizar su uso. Una de estas técnicas es la de reforzar el concreto con fibras de acero, permitiendo fabricar concretos dúctiles mejorando su comportamiento mecánico a esfuerzos tales como tensión, compresión, flexión y cortante. Por ello se hace necesario conocer su comportamiento para en cierta manera predecir cómo será el desempeño mecánico del concreto en su fabricación final. Esto conlleva a que se desarrollen ensayos directos e indirectos que permitan caracterizar un elemento de concreto con una alta precisión.

Los métodos de ensayos indirectos o ensayos no destructivos, han mejorado a lo largo de los años y han aumentado su precisión (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013), estos métodos se basan en formulaciones físicas que permiten medir parámetros de gran importancia en la evaluación y análisis, de un material o una estructura. Adicionalmente, estos equipos tienen la posibilidad de medir otros parámetros diferentes para los que están principalmente diseñados, ampliando la utilidad de los mismos y permitiendo tener un mayor número de aplicaciones e interpretaciones de su información.

Entre estos métodos uno comúnmente empleado, es el de la propagación de la velocidad de pulso ultrasónico. Éste método permite establecer la calidad constructiva de un elemento, midiendo la velocidad de propagación de una onda generada por un pulso ultrasónico, obteniendo el valor de la velocidad de onda propagada; correlacionando por ejemplo con el valor obtenido por un concreto en excelente, regular o en mal estado. Igualmente con la medición de éste parámetro también se puede conocer la porosidad, el número de grietas y la densidad de un elemento e inclusive es posible estimar la resistencia mecánica a la compresión en el elemento de manera aproximada. (PROCEQ SA, 2013).

En este sentido, en el presente trabajo se realizó una estimación del efecto que producen las fibras de acero como refuerzo para el concreto; realizando ensayos de resistencia mecánica a la compresión, tensión y flexión simultáneamente midiendo la velocidad de pulso ultrasónico, lo que permitió la generación de modelos matemáticos para analizar,

determinar y correlacionar las resistencias mecánicas en diferentes tipos de concretos reforzados con fibras. Para lograr este objetivo se desarrollaron diferentes instrumentos y equipos que permitieron medir estos parámetros mecánicos al mismo tiempo que se realizaba la medición de la propagación de la velocidad de onda.

Con la finalidad de analizar el efecto que producen las fibras de acero en las propiedades y características del concreto, se realizaron tres tipos de mezcla, la primera sin ningún contenido de fibras de acero, la segunda con un contenido de 25 kg/m^3 de fibras y la tercera mezcla con 70 kg/m^3 de fibras de acero. A cada tipo de mezcla se le realizaron ensayos de caracterización mecánica, siguiendo las normas técnicas colombianas pertinentes. Para la medición del pulso ultrasónico se empleó la norma internacional ASTM D 2845.

En cada uno de los ensayos mecánicos, se midieron la velocidad de propagación de la onda sonora y la deflexión, de cuyos resultados se generaron modelos matemáticos que permitieron analizar el comportamiento mecánico, la tenacidad de cada una de las mezclas y la evolución del daño en el concreto reforzado con fibras.

Finalmente se hacen recomendaciones con respecto a la más óptima cantidad de fibras de acero, que pudieran permitir obtener un mejor comportamiento mecánico en el concreto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Estimar el efecto de las fibras metálicas sobre la resistencia a la flexión de vigas de concreto, utilizando la técnica de velocidad de pulso ultrasónico y determinar unas ecuaciones que permitan comparar la resistencia con la velocidad de pulso, con la finalidad de estimar el daño producido en el concreto.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el comportamiento mecánico del concreto a compresión, flexión y tensión de las mezclas de concreto reforzadas con diferentes porcentajes de fibras de acero.
- Medir simultáneamente la velocidad del pulso ultrasónico mientras se realiza el ensayo de flexión del concreto de alto desempeño reforzado con fibras.
- Establecer un modelo matemático que correlacione la velocidad del pulso ultrasónico y la velocidad de onda del concreto en un proceso de carga.

3 COMPONENTES DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Planteamiento del problema

En la industria de la construcción existe una gran variedad de materiales, de los cuales el avance tecnológico ha permitido generar mayores aplicaciones, mejorando a su vez su calidad, su economía, su versatilidad y su estética.

Uno de estos materiales es el concreto, el cual se ha usado desde hace varias décadas como uno de los principales componentes de la construcción (MÁRMOL SALAZAR, 2010). Asimismo en los últimos años se han desarrollado nuevos tipos de concretos los que permitirán tener nuevos usos del mismo, aumentado su aplicabilidad (Prisco & Vandewalle, 2009). Entre las nuevas tipologías de concreto se encuentran por ejemplo los concretos de bajo peso (densidades menores a $1\,200\text{ kg/m}^3$, frente a concretos normales que tienen densidades cercanas de $2\,300\text{ kg/m}^3$), los concretos translucidos, los concretos dúctiles de alta resistencia y durabilidad, entre otros.

Esto, ha permitido producir concretos de alto desempeño, quienes presentan altas resistencias no solamente a compresión, sino también a tensión y flexión, mejorando su ductilidad y demostrando que el concreto es un material multipropósito (para diversos usos y formas). Algunas de estas ventajas se logran con el uso de fibras de acero, vidrio o poliméricas (ACI 544). Para el presente proyecto se utilizaron mezclas de concreto reforzado con fibras de acero, su diseño y dosificación se basó en las recomendaciones dadas en proyectos de investigación, como los efectuados por Paultre, Asce, Eid, Langlois, Lévesque, (P. Paultre, 2010) quienes en su proyecto diseñaron concretos que permiten una amplia deformación antes del colapso, aumentando la seguridad de una estructura.

Adicionalmente, el aseguramiento de la calidad del concreto en los últimos años ha mejorado, teniendo métodos de ensayo (sean de laboratorio, en campo, destructivos, semi-destructivos y no destructivos) que permiten caracterizar el material con bastante precisión. Los ensayos no destructivos han incrementado su empleo, gracias a la evolución de los equipos de cómputo y adquisición de datos, permitiendo que estos

ensayos sean más exactos y precisos, aumentando sus ventajas, que van desde evaluar un elemento en el sitio de fabricación hasta su sitio final.

Un ensayo indirecto común es la medición de la velocidad de onda propagada a partir de equipos generadores de ondas ultrasónicas, lo cual es aplicable para medir variables de homogeneidad y continuidad del concreto (PROCEQ SA, 2013). Sin embargo la correlación entre la resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibras y la velocidad de pulso ultrasónico, es difícil de medir debido a la complejidad al instrumentar un elemento que permita registrar la deflexión y velocidad de pulso ultrasónico, por lo cual es común realizar proyectos obteniendo la resistencia a la compresión del concreto, su deformación y la velocidad de pulso ultrasónico. (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013)

Por lo tanto, emplear metodologías que permitan correlacionar el comportamiento de un concreto de alto desempeño a flexión reforzado con fibras de acero, con una metodología de ensayo no destructiva, permitirá ampliar el uso de éste tipo de ensayo.

Es por esto que se presenta la siguiente pregunta de investigación ¿Es posible el desarrollo de correlaciones entre la velocidad del pulso ultrasónico y la resistencia a la flexión del concreto simple y de alto desempeño reforzado con fibras de acero y con estas tener una idea del daño en un elemento?

4 MARCO TEORICO

El concreto¹ es uno de los materiales de mayor uso en la industria de la construcción; tanto es así que en cualquier proyecto, el concreto tiene un porcentaje alto de participación (Guzman 2001).

Asimismo, el cemento al mezclarse con el agua y los agregados², produce una mezcla con propiedades plásticas, permitiendo su moldeo y adaptación a casi cualquier forma, un ejemplo de su uso se presenta en la Figura 1, al endurecer el material obtiene una resistencia y dureza similar a una roca; lo que demuestra su versatilidad y propiedades mecánicas; razones por las cuales a este material se le conoce como “Roca Artificial, capaz de moldearse al gusto del hombre”. Estas características son las que más se destacan del material, además la simplicidad del cómo se fabrica lo hace diferente sobre el plástico, la cerámica y el hierro (Monteiro 2006).

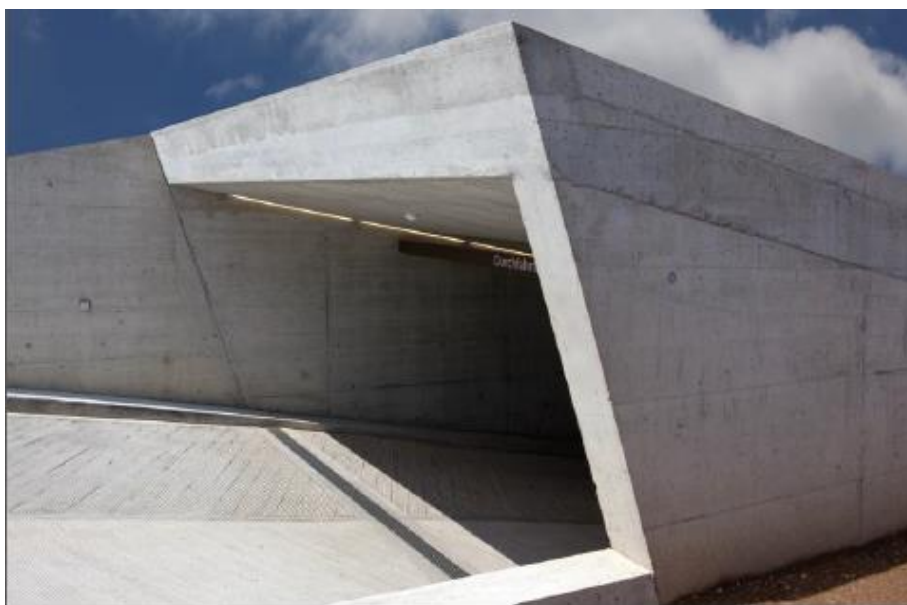


Figura 1. Ejemplo de arte con el Concreto. Fuente: Concreto reforzado con fibra, SIKA 12 p

A pesar de ser un material con tanto uso, el concreto sigue teniendo debilidades como son su poca resistencia a esfuerzos de tensión, flexión y cortante, lo que ha fomentado el

¹ Concreto: Mezcla entre cemento, aire, agua y agregados.

² Agregado: Material granular inerte de origen sedimentario o artificial.

desarrollo de investigaciones que permitan mejorar dichas propiedades (Sanchez de Guzmán, 2001), algunas de estas se muestran a continuación.

4.1 Desempeño del Concreto

Para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, se han empleado barras o mallas de acero, como se muestra en la Figura 2, esto permite que las estructuras en concreto ofrezcan mayor seguridad y mejor estabilidad. Su implementación fue irónicamente, por un deseo de hacer balsas de mejor resistencia, dando la creación de una balsa en concreto en el año 1848 (NEVILLE 1999), sin embargo dicha balsa permitió observar que el concreto podía deformarse sin colapsar, solo presentaba fisuras en el elemento, adicionalmente se incrementaba la resistencia a la flexión.

Posteriormente, se empleó esta tipología del concreto en construcción, para lo cual se empezó a recomendar el uso barras o mallas de acero embebidas, con la finalidad de lograr que las construcciones fueran más resistentes a esfuerzos que generen tensión, flexión y cortante, por ejemplo en cubiertas en edificaciones, (ARGOS 2010), este invento es atribuido al constructor William Wilkinson, de Newcastle, Inglaterra.

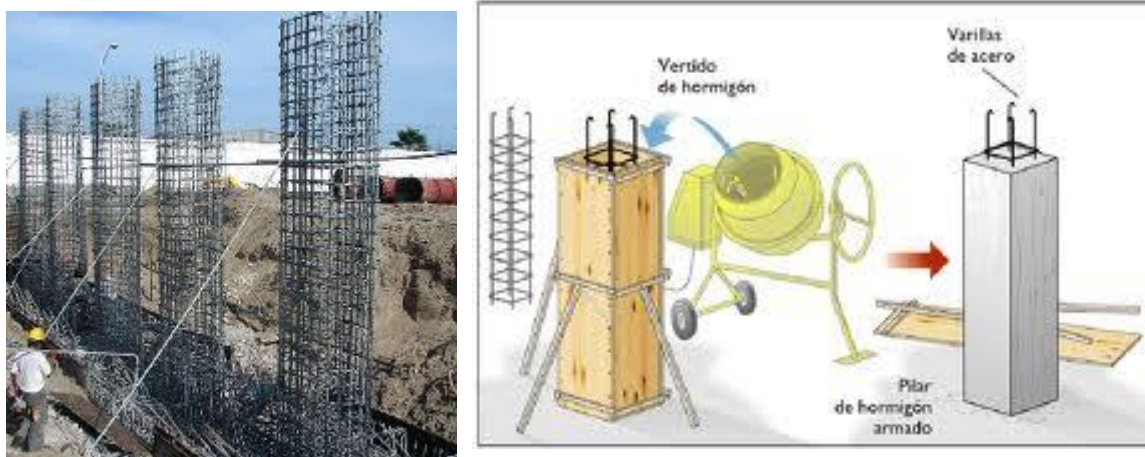


Figura 2. Detalle de refuerzo de una columna. Fuente:
<http://concretorefor.blogspot.com.co/2011/11/separacion-de-varilla-y-recubrimiento.html>.

Este avance ha permitido que las estructuras de concreto adquieran importantes resistencias a esfuerzos de cortante, flexión y tracción y por lo tanto, aumenta la resistencia de estos elementos en movimientos sísmicos; sin embargo por su naturaleza estos elementos presentan fallas súbitas, debido a que siguen siendo materiales rígidos.

Pero últimamente, han surgido nuevos materiales que han permitido mejorar las propiedades mecánicas del concreto y por ende su desempeño, lo que permite darle mayores usos a éste material; que antiguamente se pensaban inconcebibles.

Un ejemplo de estos materiales es el de las fibras de refuerzo discretas discontinuas como el amianto o asbesto, una fibra natural de altas prestaciones pero que debido a implicaciones serias que tiene este material con la salud del ser humano y animales³, se ha prohibido su uso.

4.1.1 Fibras en el Concreto

Con el ánimo de mejorar el desempeño del concreto, se han desarrollado diferentes tipos de fibras como lo son: las fibras de vidrio, las fibras poliméricas, las fibras de acero entre otras.

4.1.2 Tipo de Fibras

Las fibras de vidrio, (véase Figura 4) se han empleado entre otras en paneles o muros esbeltos, son fibras continuas o discontinuas de vidrio, permitiendo mezclarse con cemento y agregados conformando un concreto de alta flexibilidad (para referirse al material se empleará la nomenclatura GFRC por sus siglas en inglés).

Las desventajas de estas fibras se encuentran en las reacciones que ocurren con los álcalis⁴ presentes en el cemento, ocasionando un proceso degenerativo en el concreto. Su uso se ha masificado en paneles de fachada, tuberías, tejas, pavimentos, encofrados, por lo general se emplean en elementos de concreto esbeltos, tales como elementos prefabricados o piezas de dimensiones pequeñas.

³ Según la Organización internacional del trabajo, estima la muerte de 100 mil personas al año a causa de exposiciones con el asbesto.

⁴ Álcalis: Compuesto químico que se encuentra en los agregados ó áridos de una mezcla de concreto



Figura 4. Detalle de las Fibras de vidrio.

Fuente: Concreto reforzado con fibra,
SIKA 14 p



Figura 3. Detalle de las Fibras de polipropileno

Fuente: Concreto reforzado con fibra, SIKA 14

Las fibras poliméricas se han empleado para reforzar el concreto desde los años 60 (Mármol Salazar, 2010), están conformadas por un material polimérico (como polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) que se procesan por extrusión y posteriormente se cortan, ver Figura 3.

Una de las ventajas de estas fibras poliméricas es su estabilidad química, lo que significa que no reaccionan el material cementicio del concreto, adicionalmente su estructura hidrófoba, hace que no se absorba agua durante la mezcla ni después de esta. Sin embargo presentan una desventaja que es su poca adherencia con la pasta de cemento, adicionalmente las fibras poliméricas poseen un bajo módulo de elasticidad, lo que influye sobre el desempeño del concreto. (MÁRMOL SALAZAR, Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas 2010)

⁵ Fuente: Características mecánicas del Concreto reforzado con fibras. Mármol Salazar Patricia. 10 p.

⁶ Fuente: Idem. 13 p.



Figura 5. Uso de las fibras de polipropileno, en la actualidad se emplea como refuerzo secundario. Fuente: Tomado de Concreto reforzado con fibras. SIKA 2010

Su principal uso está en pavimentos o estructuras de grandes superficies, debido a que esta fibra ayuda a reducir la fisuración por contracción y retracción en el concreto, a su vez le permiten al mismo aumentar su tenacidad, disminuir su densidad y aumentar su comportamiento post-elástico, es decir, una mezcla combinada con estas fibras puede tener un comportamiento dúctil, cómo lo muestra la Figura 6. En un buen proceso de construcción empleando este tipo de concreto, se recomienda el empleo de antioxidantes; debido a que estas fibras son muy susceptibles al óxido por su material de fabricación (Prisco & Vandewalle, 2009).

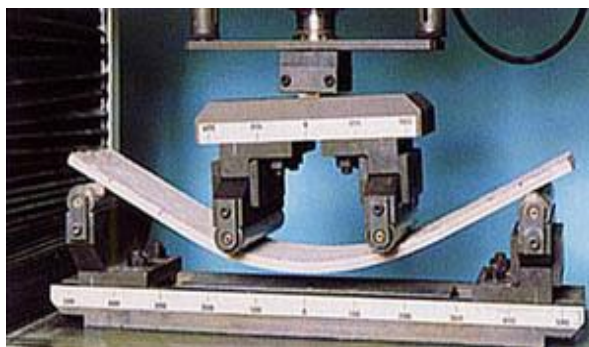


Figura 6. Amplia deformación en una viga de concreto. Fuente: Revista Asocreto N°100

Las fibras de acero son otra alternativa que se puede encontrar en el mercado, estas tienen composiciones similares a las barras de acero, pero son de mucho menor tamaño y

pueden distribuirse sobre todo el volumen de la mezcla de concreto. Las fibras de acero permiten mejorar las propiedades mecánicas del concreto como la ductilidad y la tenacidad a la fractura, pudiéndose lograr deformaciones como la mostrada en la Figura 6 sin llegar hasta la falla; es de aclarar que una de las razones de su uso es para mejorar esta característica del concreto, permitiendo que éste pueda tener un comportamiento dúctil y a su vez tener una alta resistencia a la flexotracción⁷ y compresión.

De la misma manera estas fibras presentan una mejor adherencia con la pasta de cemento, aumentando la elasticidad del concreto significativamente. Sin embargo una de sus desventajas está en la segregación⁸ de las fibras, situación que debe evitarse con un buen diseño de mezcla y un buen control de calidad in situ de la mezcla de concreto.

Las fibras de acero pueden ser fabricadas en acero al carbono o en acero inoxidable, este último para mejorar su resistencia a la corrosión, Las formas puede ser como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Formas de sección que pueden tener las fibras de acero. Fuente: Características mecánicas del Concreto reforzado con fibras. Mármol Salazar Patricia. 19 p

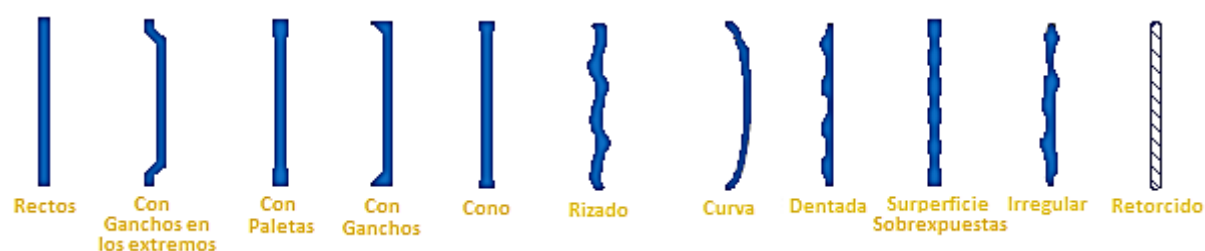


Figura 8. Forma geométricas de las fibras de acero. Fuente: Características mecánicas del concreto reforzado con fibras. Mármol Salazar Patricia. 19 p

La longitud de las fibras varía entre 25 mm a 60 mm, la elección del tamaño y forma de las fibras depende del tipo de mezcla y la necesidad del proyecto, (Mármol Salazar, 2010) (ver Figura 8). Estudios han demostrado que las fibras de acero pueden reemplazar las

⁷ Resistencia a la Flexotracción: Es la capacidad de un material al cual es sometido a esfuerzos que generaran flexión y tracción al mismo.

⁸Segregación: Terminio empleado para especificar, la tendencia de un material en reposar en el fondo de una mezcla.

barras de acero en el concreto, especialmente en elementos muy esbeltos. (Ding & Wolfgang, 1999)

4.1.3 Recomendaciones para el uso de las Fibras

El Instituto Americano del Concreto⁹, mediante el comité 544 generó una guía para diseñar y dar recomendaciones para la fabricación del concreto reforzado con fibras, con la finalidad de mejorar las técnicas de diseño y constructivas de este material.

Es de aclarar que el código ACI 318 del Instituto Americano del Concreto (guía para el diseño sismo resistente), restringe el uso de las fibras de acero como refuerzo principal del concreto. Por lo tanto las fibras han tenido un uso más común en elementos sin compromiso estructural de una edificación.

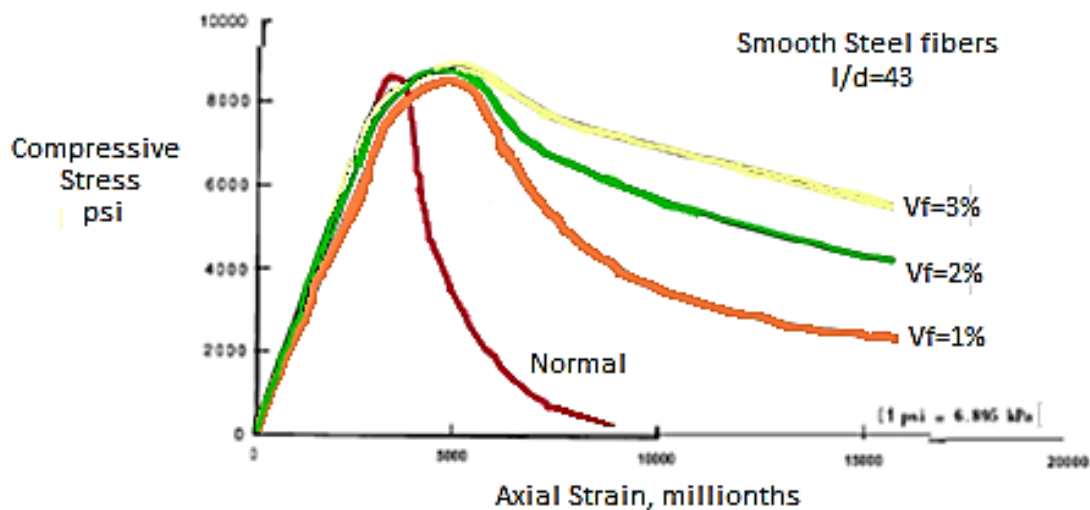
Sin embargo las recomendaciones de la guía 544 son perfectamente aplicables en cualquier tipo de concreto reforzado con fibras de acero. A continuación se hace un listado de los elementos en donde se emplean las fibras para reforzar el concreto con amplio uso y éxito.

1. *Losas de contrapiso y entrepiso (estructuralmente no comprometidas)*
2. *Pisos Industriales.*
3. *Pisos de bodegas*
4. *Carpeta de rodaduras en vías*
5. *Sitios de parqueo de elementos*
6. *Pavimentos de aeropuertos, así como sitio de parqueo de aviones.*

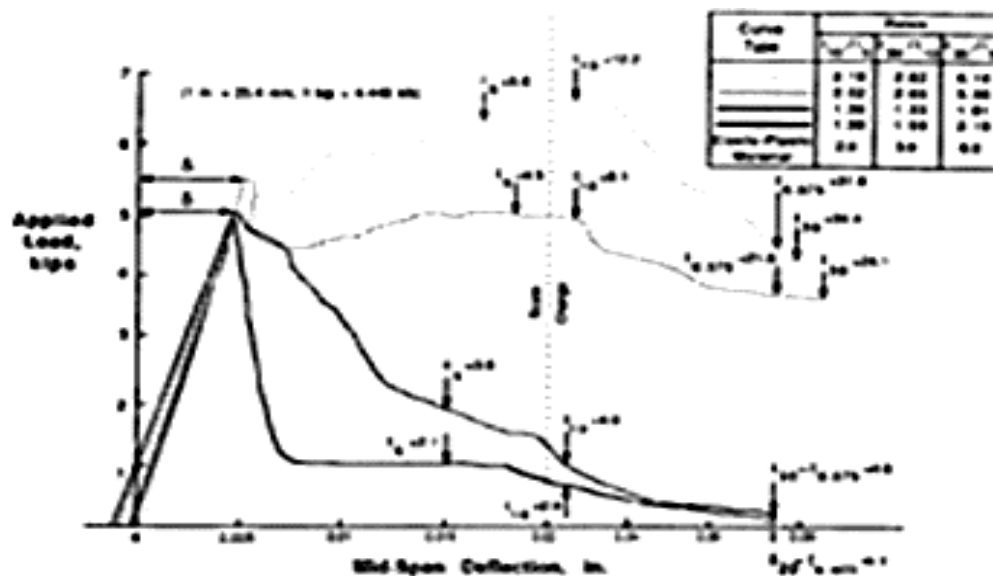
Estos elementos tienen en común varias características: entre ellas que son colocados en áreas con una cara expuesta ampliamente, en otras son concretos sometidos a cargas cíclicas y abrasivas, muy susceptibles al impacto y cargas dinámicas, igualmente son elementos sometidos a contracciones y expansiones altas al someterse a cambios de temperatura por efecto del entorno ambiental. Johnson demuestra el comportamiento dúctil de un concreto reforzado con fibras en la Gráfica 1 y 2, mejorando la tenacidad del concreto. (Johnson 1982).

⁹ ACI: Sigla empleada para identificar el instituto americano del concreto

Por lo tanto el uso del concreto SFRC¹⁰ mejorará en el comportamiento que ofrecen las fibras con respecto a estas características.



Gráfica 1. Esfuerzo vs deformación del Concreto Reforzado con Fibras de Acero sometido a compresión con diferentes contenidos de fibras¹⁸.). (Johnson 1982).



Gráfica 2. Curvas de cargas vs deformación a flexión para varios Concretos variando el tipo de fibras (relación l/d). (Johnson 1982).

¹⁰ SFRC: Steel Fiber Reinforced Concrete, en español Concreto Reforzado con Fibras de Acero.

Sin embargo, no son los únicos usos que se le pueden dar a éste tipo de mezclas, en la Tabla 1 se muestra un listado de algunas de las propiedades mecánicas que una mezcla SFRC puede o no mejorar en el comportamiento mecánico del concreto. Tabla 1

<i>Propiedad</i>	<i>Comportamiento</i>
Resistencia a la Compresión	Al observar las gráficas 1 y 2, la resistencia a la compresión del concreto se mejora ligeramente, pero algunas investigaciones han demostrado que al tener contenidos de fibras del alrededor del 2%, con una relación $l/d = 100$ la resistencia a la compresión puede aumentar al 23% (Williamson 1974). Igualmente cuando el porcentaje es mayor la resistencia a la compresión disminuye (Ding & Wolfgang, 1999).
Tensión Indirecta	El concreto reforzado con fibras no tiene un comportamiento distinto al concreto sin refuerzo, cuando es sometido a tensión. (comité ACI 544)
Resistencia a la flexión	Una de las principales mejoras que tiene el concreto reforzado con fibras es la resistencia a la flexión del concreto, la cual se puede mejorar entre 3 a 4 veces que la del concreto sin refuerzo y se pueden obtener mejores resultados de resistencia que con refuerzo normal (comité ACI 544).
Dureza Flexional	Como la dureza flexional es proporcional a la resistencia a la flexión (se calcula cómo el área bajo la curva de la gráfica de esfuerzo vs deflexión de un elemento sometido a flexión), también las fibras aumenta la dureza del concreto.
Fisuramiento y Contracción	Aumenta debido a que esta característica es empleada en superficies amplias, como lo son losas y pisos en concreto.
Resistencia al Congelamiento	No mejoran esta propiedad, pero ayudaría a controlar el fisuramiento por congelamiento.
Resistencia a la Abrasión/Cavitación/Erosión	Se mejora la resistencia a la abrasión y cavitación; debido a que el concreto tiene un comportamiento más isotrópico y homogéneo, por la distribución de las fibras en la mezcla del concreto, mejorando esta propiedad mecánica; sin embargo no hay cambio alguno con respecto a la erosión; si se desea mejorar esta propiedad la guía recomienda reducir el contenido de agregado fino, compensándolo con pasta de cemento (comité ACI 544).
Desempeño bajo cargas dinámicas	Las mezclas SFRC tienen un mejor desempeño ante cargas dinámicas, debido a que tienen una capacidad mayor de absorción de energía (Suaris and Shah 1983; Naaman and Gopalaratnam 1983; Gopalaratnam, Shah, and John 1984; Gopalaratnam and Shah 1986), a su vez la disipación de la misma, puede obtener resistencias entre 40 a 100 veces mayor que la del concreto sin refuerzo.

Tabla 1. Comportamiento de propiedades mecánicas sometidas normalmente al concreto. Basado en el comité 544 de la ACI.

Igualmente, la guía elaborada por el comité ACI 544 realiza recomendaciones para el diseño de elementos que se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Recomendaciones del comité ACI 544 para el diseño y elaboración de elementos en concreto.

Basado en la guía ACI del comité 544.

Elemento	Recomendación
Losas	<p>La elaboración de losas en concreto es la mayor parte de las aplicaciones de una mezcla SFRC, sean estas para bodegas, pisos industriales; como para vías, en tableros de puentes vehiculares o sitios de estacionamiento, se debe a que las fibras de acero reduce la fisuración por expansión y contracción, lo cual en un elemento como estos son muy susceptibles al tener una superficie ampliamente expuesta a las condiciones climáticas. Como recomendación la guía hace énfasis en que una mezcla SFRC <u>reduce la manejabilidad</u>, por lo tanto se debe usar un superplastificante, a su vez el uso de cemento de bajo calor de hidratación es recomendable, debido a que una mezcla SFRC aumenta la concavidad de la losa debido a su flexibilidad, por lo tanto éste tipo de cemento ayuda a controlar éste fenómeno.</p>
Vigas	<p>Para las vigas, el uso de las fibras mejora el comportamiento ante cortante con respecto al concreto reforzado tradicionalmente. Según la guía ACI del comité 544, si se emplea la siguiente ecuación, puede hacerse una aproximación de la resistencia del concreto, según la cantidad de fibras empleadas y la relación l/d de las mismas; esta es:</p> $\sigma_{cu} = 0,97 f_r V_m + 494 V_f l/d_f$ <p>donde f_r = Módulo de ruptura del concreto; V_m = Volumen de fibras en la matriz = $1 - V_f$; V_f = Volumen de la fracción de las fibras = $1 - V_m$; l/d_f = Relación longitud diámetro de las fibras. Al igual que las losas; se recomienda el uso de superplastificantes para aumentar la manejabilidad de la mezcla.</p>
Concreto Lanzado	<p>El concreto lanzado se emplea para reforzar estructuras existentes, como rocas fracturadas, reparación de concreto deteriorado etc. Para lo cual se emplea un concreto el cual se expande y permite sellar fisuras o grietas en una estructura; las fibras ayudan a que este tipo de concreto tenga más resistencia, pero siga teniendo una matriz fina, para poder penetrar en la estructura.</p>

De esta manera la guía del comité ACI 544 hace recomendaciones para trabajar con mezclas SFRC de manera adecuada; se resalta que el uso de una mezcla SFRC reduce la manejabilidad así como aumenta el contenido de aire, perjudicando la duración, por lo tanto se recomienda reducir la permeabilidad del concreto por ejemplo usando una resina epóxica en su superficie o un impermeabilizante (comité ACI 544), lo que conlleva a

preguntarse si la durabilidad de un elemento compuesto, será una de las debilidades del empleo de las fibras en el concreto.

4.2 Durabilidad en el Concreto

La guía ACI tiene recomendaciones para la producción de mezclas de concreto con alta durabilidad, enfatizando las acciones químicas o mecánicas que afectan al concreto; estas recomendaciones se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción de Acciones químicas o mecánicas que afectan el concreto. Basado en el comité ACI 201.2.

ACCIONES QUÍMICAS	ACCIONES MECÁNICAS
<i>Agentes descongelantes</i>	Congelamiento, descongelamiento
<i>Ataques por sulfatos</i>	Abrasión
<i>Ataques por sales (no presentes en el agua)</i>	Corrosión de metales embebidos en el concreto
<i>Exposición a Aguasalina</i>	Reacción álcalis con agregados
<i>Ataque por ácido</i>	Fisuramiento del concreto
<i>Carbonatación</i>	N/A

Si se desea realizar una mezcla de concreto durable; se debe analizar cada una de estas variables, desde el sitio de mezclado, hasta el lugar en donde se va a encontrar el elemento en concreto (sin importar si es reforzado con barras o con fibras). Si hay probabilidad que alguna o todas estas acciones ocurran, la mezcla de concreto deberá fortalecerse de forma tal que resista parcial o totalmente la acción. Igualmente hay recomendaciones básicas dadas por el comité ACI 201.2, las cuales pueden aplicarse sin importar si el concreto va a estar expuesto a este tipo de acciones o no. Estas se resumen a continuación.

-
1. Reducir la relación agua material cementante (a/c o a/mc) de la mezcla de concreto. Esto puede ser mediante la aplicación de aditivos plastificantes o superplastificantes; se debe a que las fibras de materiales compuestos (como fibras de vidrio, de acero o poliméricas) absorben agua lo cual reduce la plasticidad de la mezcla.
 2. Una vez endurecido el concreto, realizar un curado constante, al menos 7 días posteriores, se recomienda emplear membranas o resinas que protejan de la exudación del concreto al humedecerlo constantemente; inclusive cuando el concreto tiene superficies amplias expuestas al medio ambiente; se puede utilizar arena humedecida; esta ayuda a preservar la temperatura y la humedad del elemento.
 3. Reducir la permeabilidad del concreto; mediante el vibrado adecuado al elemento, sin embargo por ninguna circunstancia excederse en la vibración de una mezcla; producirá segregación y si la mezcla es muy fluida no se debe vibrar. Asimismo para reducir la permeabilidad de una mezcla de concreto se recomienda utilizar inclusores de aire; que reducen la permeabilidad del concreto, al sellar los caminos de exudación del mismo en climas fríos. (American Concrete Institute, 2001).
 4. Evitar la corrosión de los elementos metálicos de la mezcla del concreto; esto puede ser con baños de resina epóxica al acero de refuerzo; o simplemente cubriendo el acero y limpiar frecuentemente para evitar su oxidación, antes de ser embebidas en el concreto. En el caso de las fibras, estas deben estar envueltas en bolsas hasta que se vayan a usar; no se deben exponer al medio ambiente, por periodos prolongados.
 5. Evaluar los agregados químicamente, para establecer si estos tienen componentes que puedan reaccionar negativamente con el cemento (el ACI recomienda realizar ensayos de petrografía en los agregados para determinar muy aproximadamente los elementos químicos que la componen). Por ejemplo la presencia de agentes químicos en el agregado, tal como el álcali, se pueden tolerar en un porcentaje no mayor al 3% (American Concrete Institute, 2001). Si es

inevitable el uso de agregados con agentes reaccionantes, se debe aumentar el recubrimiento del cemento a los agregados. (Guzman, 2001).

6. Emplear aditivos y adiciones en la mezcla de concreto como las puzolanas o las escorias de alto horno entre otros, que permiten fortalecer la mezcla ante ataques por carbonatación o ácidos. Esto siempre y cuando se conozca que no afectará la resistencia de la mezcla.
7. Cerciorarse sobre la calidad del agua de mezclado para el concreto, teniendo en cuenta que el contenido máximo de sales no debe superar 5% y el contenido de materia orgánica el 2%. Asimismo confirmar si el pH del agua es superior 7; por debajo de éste, el agua es totalmente perjudicial para el concreto al contener elementos ácidos en su composición.

A pesar de estas recomendaciones, cuando un elemento se encuentra afectado por alguna de estas acciones; la guía del comité ACI 201.1 recomienda hacer una evaluación patológica la cual determine si el elemento puede ser reparado o no. Si el elemento puede ser reparado la guía del comité 201.1 ACI da las siguientes recomendaciones:

1. Limpiar las superficies y armaduras muy bien, sea con un baño de arena inyectado a presión (Sandblasting).
2. Limpiar las armaduras del concreto (cuando el concreto tiene barras de acero embebidas) hasta que no se note presencia de óxido en las mismas.
3. Proteger la armadura con un baño de resina epóxica.
4. A su vez fortalecer la armadura con una protección catódica.
5. Retirar el concreto afectado y reemplazarlo con un concreto el cual contenga un inhibidor de corrosión, sí es necesario ayudar a la adhesión de elementos nuevos con los viejos, mediante un pegante epóxico.
6. El concreto que se vaya emplear para reemplazar el antiguo, se recomienda que sea aplicado bajo presión, para que haya un mejor cubrimiento del antiguo. Junto con la aplicación del mismo, se recomienda el empleo de resina epóxicas.

La guía del comité ACI 201.1 promueve las buenas prácticas del concreto, con la finalidad de que sea más durable y por lo tanto más seguro. Para esto es necesario la correcta

selección de los materiales, el correcto diseño y la correcta aplicación en obra del mismo; si cada una de estas variables no se realizan de manera adecuada; muy seguramente la mezcla de concreto va presentar problemas de durabilidad.

Investigaciones desarrolladas

A continuación se presentan algunos trabajos relacionados, en los que se ha investigado con respecto a las fibras de acero y su empleo en el concreto de cemento portland.

Los investigadores Köksal, Altun, Yigit, & Sahin estudiaron el efecto combinado del humo de sílice y las fibras de acero en las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia. Esta investigación consistió en el uso del humo de sílice en mezclas de concreto con fibras de acero, con la finalidad de observar el comportamiento mecánico del mismo. Para tal finalidad las características de los materiales de las mezclas fueron, cemento Portland y humo de sílice como materiales cementantes, una relación agua material cementante de 0,38 para un asentamiento de 120 mm y un aditivo reductor de agua al 1%. El aditivo se empleó debido a que las fibras de acero y el humo de sílice reducen la manejabilidad del concreto.

De la misma manera, las fibras de acero fueron empleadas en un contenido entre el 0,5% al 1%¹¹ y el humo de sílice entre 0% al 15% del peso del cemento (con variaciones del 5%). Las características de las fibras se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de las fibras de acero. Fuente: (Köksal, Altun, Yigit, & Sahin, 2008)

Tipo	Longitud (mm)	Diámetro D (mm)	Aspecto l/d	Densidad (g/cm ³)	Tensión (N/mm ²)
Dramix RC 65/40 CN	40	0,615	65	7,85	1100
Dramix RC 65/40 CN	40	0,615	65	7,85	1100

¹¹ A su vez las fibras de acero empleadas eran de tipo de longitud y espesor del 65% al 80%.

Para el desarrollo de la investigación se realizaron un total de 20 mezclas SFRC y humo de sílice, generando más de 90 probetas para los ensayos, desencofrandolos a las 24 horas, para dejarlas en curado hasta la realización de ensayos a los 28 días después de fundidas. Las probetas tuvieron una relación L/D^{12} de 2, con un diámetro de 150 mm y longitud de 300 mm para realizar ensayos de compresión axial y módulo de elasticidad, realizando 3 ensayos de cada ensayo y por cada mezcla.

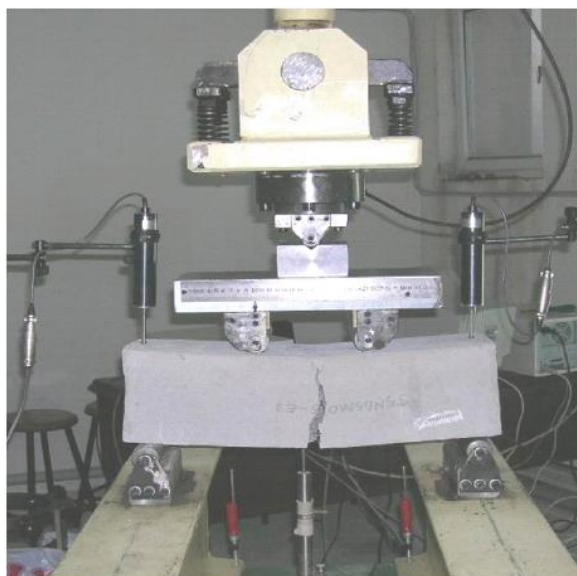


Figura 9. Ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión de la mezcla SFRC. Tomado de F. Kosal et al. / Construction and Building Materials página 3 (2008)

De la misma manera se realizaron ensayos de tensión indirecta en cilindros de 100 mm de diámetro por 60 mm de espesor, al igual se realizaron ensayos de resistencia a la flexión de 150 mm x 150 mm x 500 mm. Estos ensayos se realizaron bajo requerimientos de la norma ASTM. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente Tabla 5, los cuales fueron base para determinar las dosificaciones de fibras de acero empleadas en este trabajo.

Tabla 5. Tipos de mezcla y resultados obtenidos. Tomado de F. Kosal et al. / Construction and Building Materials 22 (2008)

Mezcla	Humo de sílice (%)	Relación (l/d)	Contenido de fibra de acero	Peso unitario (kg/m ³)	Asentamiento (cm)	Resistencia a la compresión	Módulo de elasticidad (kN/mm ²)	Resistencia a la tensión indirecta	Resistencia al flexión (N/mm ²)	Tenacidad (Joule)
--------	--------------------	----------------	-----------------------------	------------------------------------	-------------------	-----------------------------	---	------------------------------------	---	-------------------

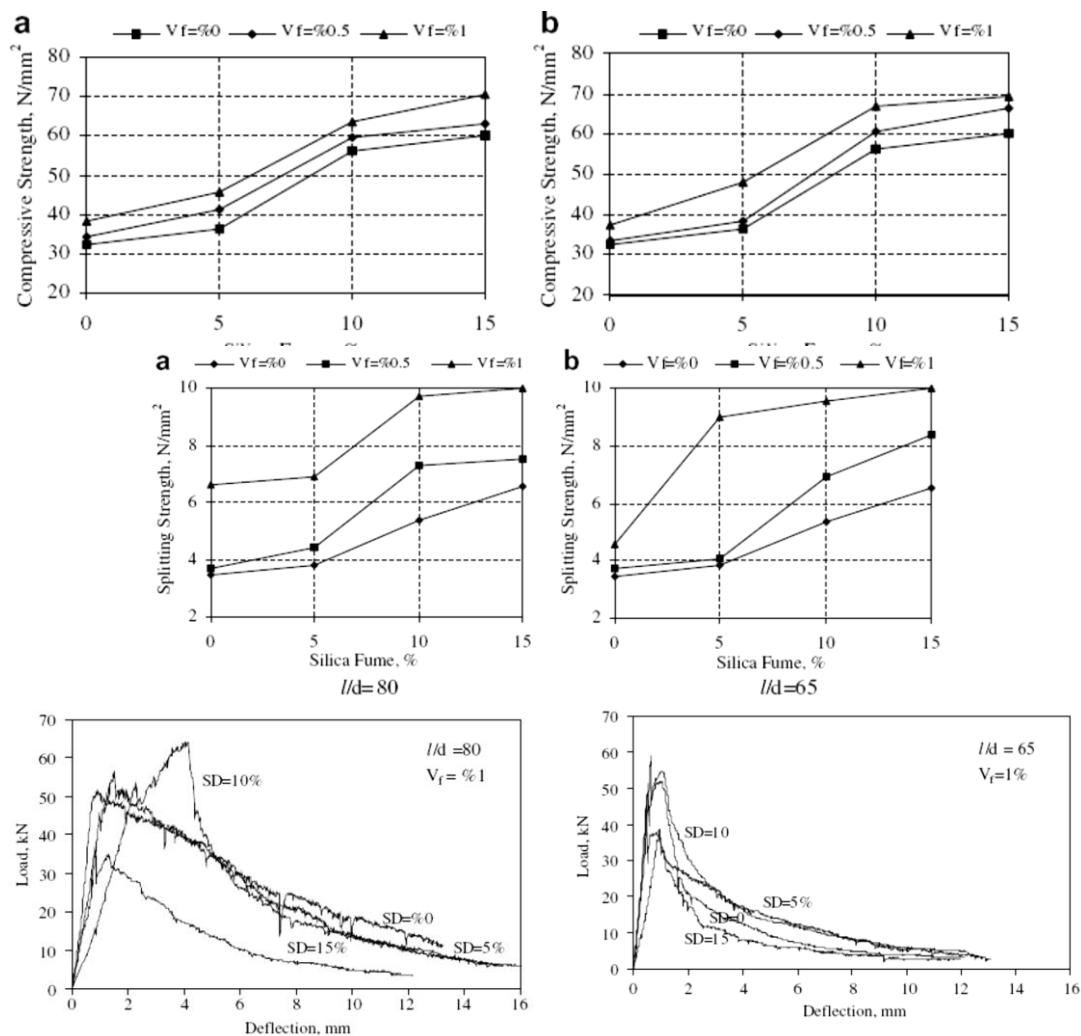
¹² L/D relación entre la longitud y el ancho de las fibras.

		V _I (%)		(N/mm ²)		(N/mm ²)				
A	0	-	0	2442	12	32,4	33,8	3,48	5,70	-
		65	0,5	2453	10	33,4	32,0	3,75	5,90	81
		65	1,0	2478	8	37,3	31,6	4,59	6,69	153
		80	0,5	2451	10	34,1	32,6	3,70	6,10	166
		80	1,0	2470	7	38,5	31,7	6,60	10,10	356
B	5	-	0	2428	12	36,4	39,4	3,82	6,10	-
		65	0,5	2441	10	38,3	37,8	4,05	7,20	95
		65	1,0	2468	7	48,1	34,9	8,98	8,70	141
		80	0,5	2445	9	41,4	38,1	4,40	7,60	190
		80	1,0	2472	4	45,7	35,9	6,90	10,30	360
C	10	-	0	2414	11	56,2	42,5	5,36	8,08	-
		65	0,5	2432	8	60,4	39,1	6,91	8,50	131
		65	1,0	2463	5	66,9	38,2	9,56	9,66	152
		80	0,5	2434	7	59,7	39,6	7,30	8,98	173
		80	1,0	2461	5	63,7	38,4	9,70	11,30	304
D	15	-	0	2392	8	60,1	48,6	6,54	9,35	-
		65	0,5	2422	5	66,5	43,3	8,40	9,52	76
		65	1,0	2452	4	69,3	40,6	10,01	10,28	107
		80	0,5	2426	5	63,2	46,4	7,50	9,58	159
		80	1,0	2449	3	70,5	41,3	10,00	12,80	183

Los autores afirman en su artículo que las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la flexión y tensión del concreto, se incrementaron de manera circunstancial, igualmente hubo aumento en la resistencia a la compresión. Sin embargo el módulo de elasticidad, no sufrió cambios considerables como mencionan otros autores (Köksal, y otros 2008) con porcentajes más altos de humo de sílice, fibras de acero y mejor relación l/d, presentando una disminución en dicho valor; lo que debe tenerse en cuenta para el uso de una mezcla de éste tipo.

Los resultados mostrados en la Tabla 5, se resumen observar en las siguientes gráficas, la cuales muestran el comportamiento de la resistencia a la compresión del elemento, con respecto al porcentaje empleado de humo de sílice, mostrando el comportamiento dúctil

que adquiere con las fibras y el aumento en la resistencia del material, con el humo de sílice.



Gráfica 3. Resumen visual obtenido en la investigación. Fuente: Köksal et al. / *Construction and Building Materials* 22 (2008).

Los resultados obtenidos por (Köksal, y otros 2008) demuestran que las mezclas SFRC permiten mejorar las propiedades mecánicas del concreto, tales como lo son la resistencia a la tensión y flexión las cuales llegan a duplicarse. Si se observa la Gráfica 3 el concreto llega a tener un comportamiento dúctil, al aumentar el contenido de las fibras; lo que demuestra que las fibras y el humo de sílice son elementos que hacen un aporte significativo, sin embargo hay que respetar las cantidades óptimas recomendadas por

(Köksal, Altun, Yigit, & Sahin, 2008) si se exceden, se disminuye la elasticidad del concreto.

La dosificación recomendada para que no afecte la elasticidad del concreto fue: un contenido del 15% de Humo de Sílice y 1% de fibras de acero con respecto al peso del cemento, de una relación l/d de 65% (Köksal, Altun, Yigit, & Sahin, 2008).

Otra investigación sobre el tema, fue una realizada por los investigadores Yining Ding y Wolfgang Kusterle del Instituto de Construcción y de Ensayos Materiales, perteneciente a la Universidad de Innsbruck Technikerstr en Austria (Ding & Wolfgang, 1999); en la cual compara el comportamiento de paneles de concreto reforzados con fibras de acero (variando su contenido entre 20 kg/m³, 40 kg/m³, 60 kg/m³) y concreto reforzado con mallas de acero de 6 mm de diámetro y 100 mm de espaciamiento, resaltando que estos son los diámetros mínimos exigidos por las normas austriacas.

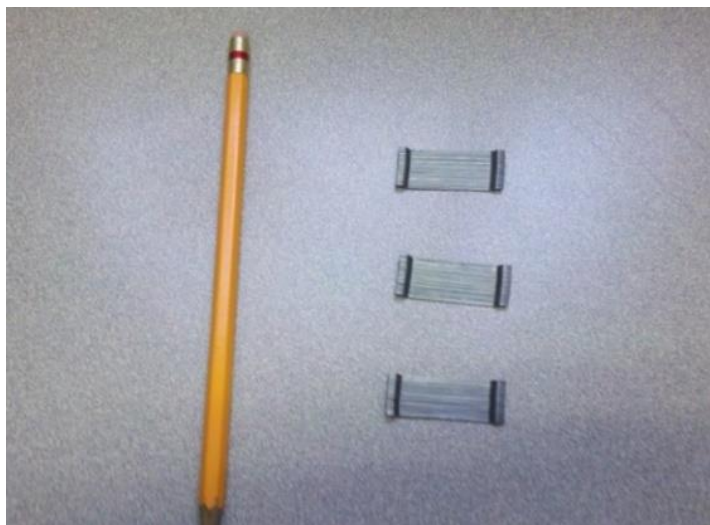


Figura 10. Detalle de fibras de acero, tamaño y forma vista real. Fuente: El autor.

Para lo cual construyeron paneles de dimensiones 50 cm x 50 cm, 60 cm x 60 cm, 70 cm x 70 cm, todas con un espesor de 100 mm, tal como lo muestra la Figura 11. En el centro de masas se encuentra un rectángulo sombreado, este es el sitio en donde éste panel será sometido a una carga axial sobre apoyos simples, tal como lo muestra la Figura 12. Estos ensayos se realizaron en concretos de 10, 18, 30 y 48 horas.

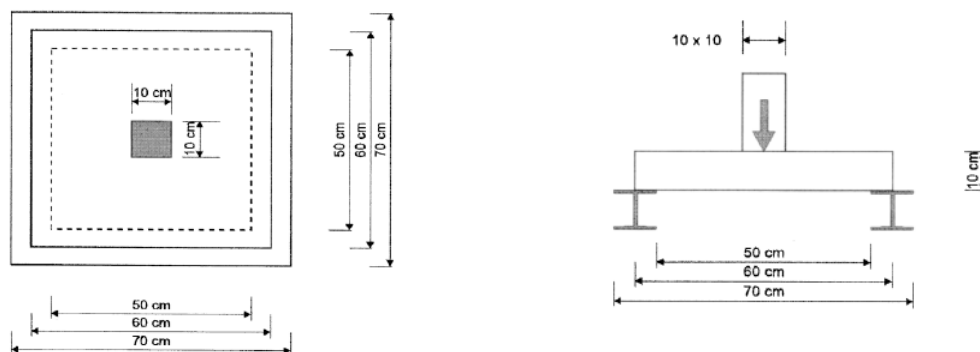


Figura 11. Vista en planta de los paneles fabricados. **Figura 12.** Apoyo de paneles y tipo de carga aplicado.
Fuente: Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests, página 2.

En dicha investigación; observaron que dependiendo de la cantidad de fibras y de la edad del concreto, este mejoraba su comportamiento mecánico con respecto a los concretos reforzados con la malla de acero.

El mejor resultado obtenido fue para la mezcla SFRC 60 (60 kg/m^3), obteniendo la mayor resistencia a la flexión, mejorando el módulo de elasticidad, con el mejor resultado de ductilidad, esto se puede observar en la Gráfica 4. Sin embargo su resistencia a la compresión no tuvo cambios significativos (se obtuvieron en promedio 37 MPa, valores similares obtenidos con las demás mezclas de SFRC y mejores que la resistencia a la compresión obtenida con el concreto sin refuerzo, la cual fue de 35 MPa).

Adicionalmente una mezcla SFRC 60 es un 20% más pesada que con la malla de acero y 30% más con respecto a las otras, lo cual es una desventaja al tener estructuras con elevado peso.

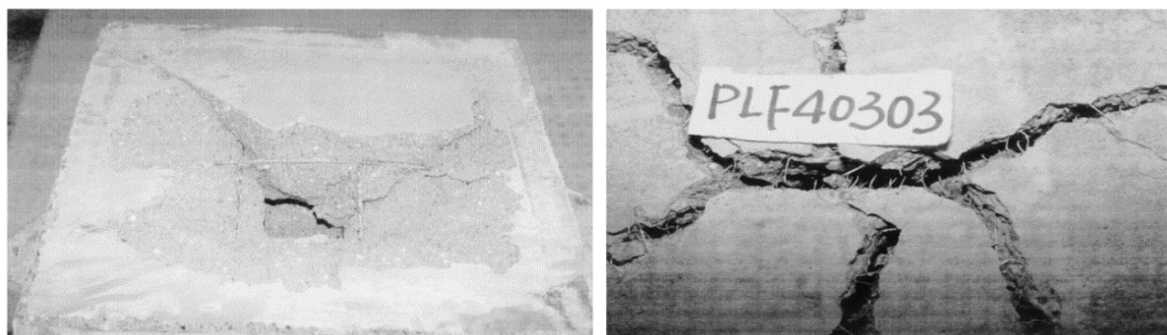
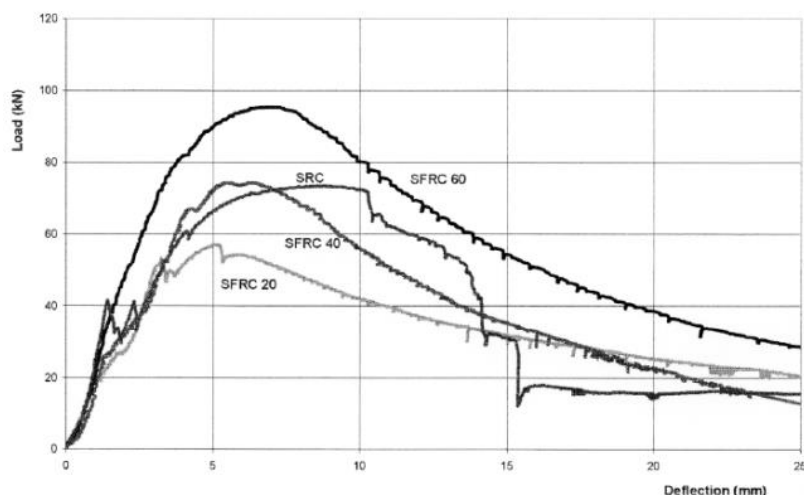


Figura 13. Esquema de falla del panel en concreto SRC¹³



Gráfica 4. Resultados del proyecto de Yining y Wolfgang a una edad de 48 h¹⁴.

Sin embargo con la mezcla SFRC 40 (40 kg/m³) tuvo un comportamiento muy parecido al concreto reforzado con la malla de acero, por lo cual es una posibilidad que se puede considerar, adicionalmente tuvo un mejor comportamiento en el rango plástico (ver Gráfica 4), generando una estructura más estable al momento de una sobrecarga.

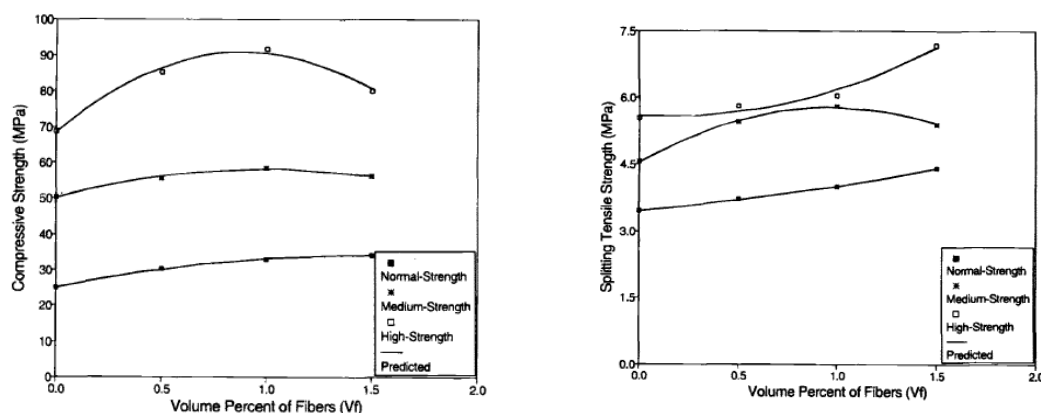
Con estos resultados Yining Ding y Wolfgang Kusterle opinan que se puede reemplazar las barras de acero por fibras de acero, sin embargo advierten que aún falta realizar más investigaciones con otro tipo de fibras de acero y otros tipos de concretos, debido a la variación que existe entre los agregados.

Otra investigación sobre el tema; fue desarrollada por Ali R. Khalo y Nakseok Kim en su investigación sobre “propiedades mecánicas de concretos de alta resistencia, reforzados con fibras de acero”, la cual consistió en variar el contenido de fibras de acero en 0,5%, 1% y 1,5% del peso del concreto, para mezclas con resistencias a la compresión de 25 MPa, 50 MPa y 69 MPa, con la finalidad de observar la variación en las propiedades mecánicas, como lo son la resistencia a la compresión, tensión y flexión, esto se muestra en la Gráfica 5.

¹³ Fuente: Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests, página 7.

¹⁴ Explicación de símbolos: SFRC – Concreto reforzado con fibras, los números significan la cantidad de fibras empleada por kg/m³. SRC – Concreto reforzado con malla de acero

A medida que aumentó el contenido de fibras de acero en el concreto, se incrementó la resistencia, tanto a tensión como a compresión en los tres tipos de mezcla. Sin embargo en el concreto de alta resistencia, tuvo un mejor desempeño en los ensayos de resistencia a la compresión, con el contenido medio de fibras de acero (1%), que con el alto contenido de las mismas (1,5%), por lo cual cuando el diseño de mezcla es de alta resistencia a la compresión, se debe usar una menor cantidad de fibras para no perjudicar a la misma. Resultados similares se obtuvieron para la determinación del módulo de ruptura.



Gráfica 5. Gráfica del comportamiento del concreto SFRC, resistencia a la compresión a la derecha y resistencia a la tensión a la izquierda.

Sin embargo los autores recomiendan tener precaución al momento de mezclar, esto puede ocasionar que las fibras de acero se puedan segregar en la mezcla de concreto por lo tanto la vibración en el concreto no debe ser muy alta.

Por lo tanto obtener un concreto con comportamiento dúctil es posible, sin embargo es necesario desarrollar mayores investigaciones que permitan diseñar una mezcla de concreto dúctil, con el uso de nuevos materiales que se están desarrollando, esto con la finalidad de conocer la forma como se deben emplear en las construcciones, además de aprovechar las ventajas que este presenta.

Como se puede observar en el análisis de los artículos anteriores las fibras de acero permiten reemplazar las barras y las mallas de acero en la fabricación de concreto reforzado. En Colombia, se ha estado adoptando el refuerzo del concreto con fibras de

acero, pero su aplicación no ha sido fortalecida (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010); tanto es así que la norma NSR 10 en su título C¹⁵, establece que se puede usar el concreto reforzado con fibras de acero, siempre y cuando el concreto sea de peso normal, igualmente en el numeral CR 3.5.8 de la NSR 10 establece lo siguiente *“Debido a que no se dispone de datos sobre el potencial de problemas de corrosión causados por acción galvánica, no es recomendable el uso de fibras de acero corrugadas en elementos reforzados con barras de acero inoxidable o galvanizadas”*.

A esto se suma que la normativa disponible en el país es muy escasa y para poder trabajar con criterios de calidad en este material, se cuenta con normas tal como la Norma Técnica Colombiana NTC 5214¹⁶; ésta establece especificaciones para la fabricación de fibras de acero, pero aún no hay normas del cómo usar las fibras en conjunto con el concreto y además no hay especificaciones para el empleo de las mismas para su uso como material de refuerzo en el concreto.

Esto conlleva a pronosticar que el concreto tendrá mayores aplicaciones en un futuro en Colombia y que dependiendo de los estudios que se realicen sobre el mismo, se podrá mejorar la estabilidad y la seguridad de estas aplicaciones, esto permitirá que se desarrollen proyectos con mejor aprovechamiento de espacios, más altos, más livianos, más rápidos en su construcción, más seguros y con mejor optimización de los recursos disponibles.

Estos tipos de concretos permitirán generar elementos más esbeltos, al igual que paredes, losas y vigas, aprovechando mejor el espacio y la súper estructura será más liviana, por esto es necesario conocer el comportamiento de éste tipo de material bajo las condiciones y los materiales usados en el medio Colombiano.

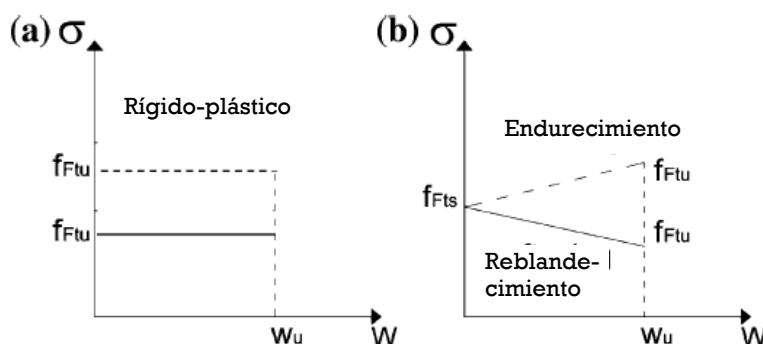
4.3 Leyes constitutivas en esfuerzos uniaxiales a tensión

¹⁵ NSR-10: Norma Sismoresistente Colombia. Título C Requisitos del concreto estructural.

¹⁶ NTC 5214: Fibras De Acero Para Refuerzo De Concreto.

Para comprender mejor el comportamiento mecánico del concreto con fibras, debe conocerse lo que sucede cuando es sometido a tensión; estado de esfuerzo en el cuál el concreto no posee mayor resistencia.

En éste caso las mezclas SFRC presentan dos comportamientos simples, rígido-plástico y pos-fisuramiento lineal (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009) tal como se muestra en la Gráfica 6.



Gráfica 6. Diagrama del comportamiento a tensión de mezclas SFRC, en el eje x es la deformación unitaria del material y en el eje y el esfuerzo mecánico sometido al mismo. Tomado de (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009) página 1275.

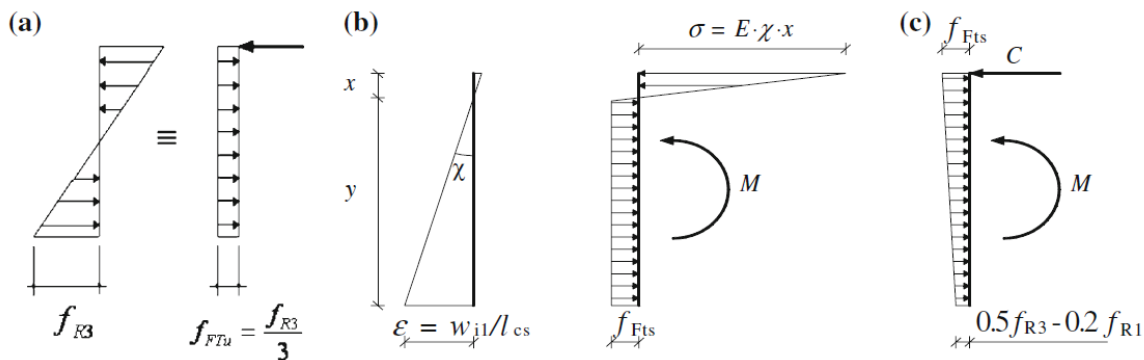
Cuando un material rígido-plástico se somete a un esfuerzo mecánico, se fisura en el punto máximo de su resistencia presentando colapso; en cambio cuando el material tiene un comportamiento electo-plástico al instante de llegar a su carga máxima, éste sufre de re-endurecimiento y por lo tanto gana resistencia, presentando en éstos instantes alto agrietamiento sin colapsar de manera súbita. Lo ideal es que un material tenga un comportamiento electo-plástico que puede obtenerse mediante el uso de fibras de acero que ocasionan éste comportamiento en el concreto (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009). A continuación se explicará en qué consiste éste comportamiento.

4.3.1 Modelo rígido plástico

Un modelo rígido plástico hace referencia a un comportamiento único en el estado límite de esfuerzo del material (f_{FTU}); equivalente a modelos estáticos (ver Gráfica 7); en éste

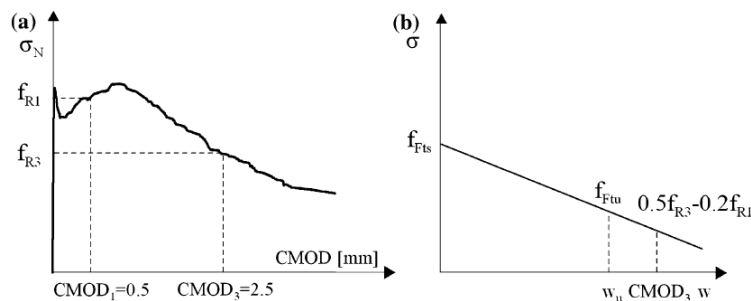
límite es que las fibras trabajan y mejoran el comportamiento del concreto definiéndose cómo:

$$f_{FTu} = \frac{f_{R3}}{3} \text{ Ecuación 1}$$



Gráfica 7. Modelos simplificados de a. Esfuerzo último a tensión de forma uniaxial (f_{FTU}); b. Esfuerzo a tensión (f_{FTS}) en el comportamiento elástico de un material; c. f_{FTU} en un modelo lineal. Tomado de (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009) página 1281.

Igualmente al realizar el diagrama de esfuerzo deformación del concreto se obtiene la Gráfica 8.



Gráfica 8. A. Resultados típicos en un material rígido plástico; b. Linealización del comportamiento plástico de la gráfica. Tomado de (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009) página 1277.

De acuerdo al análisis del comportamiento de las gráficas anteriores (Marco, Plizzari, & Lucie, 2009) se expone la Ecuación 2; la cual permite calcular el esfuerzo residual del elemento. Para el uso de la ecuación debe tenerse en cuenta lo siguiente: F = carga última del elemento; L = luz libre entre apoyos del elemento sometido a flexión; b y h = medidas de la sección del elemento (aplica en secciones rectangulares).

$$f_{R3} = \frac{3F(CMOD_3).L}{2b.h_{sp}^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

4.3.2 Modelo lineal post-fisuramiento

Un modelo post-fisuramiento es caracterizado por los parámetros de esfuerzo final; estos se definen empleando las siguientes ecuaciones (Lemaitre, 2009):

$$f_{FTU} = 0,45f_{R1} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$f_{FTU} = f_{FTs} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{FTs} - 0,5f_{R3} + 0,2f_{R3} + 0,2F_{R1}) \geq 0$$

Estas ecuaciones permitirán obtener esfuerzos del material una vez presentada la primera fisura en una mezcla reforzada con fibras de acero.

4.4 Daño mecánico

Para conocer el comportamiento del daño en un elemento, es necesario saber el inicio y el final del proceso en un elemento (Lemaitre, 2009); se establece que un material está libre de daño, si éste no posee fisuras visibles en un microscopio (Lemaitre, 2009), cuando un elemento presenta un daño avanzado se pueden visualizar las fisuras sin necesidad de un instrumento.

Por ejemplo cuando las fisuras están entre 0,1 mm – 1 mm en el acero, 1 cm en la madera y 10 cm en el concreto, se dice que tienen un daño avanzado, la debilidad del elemento es inminente (Lemaitre, 2009).

Igualmente el daño se puede atribuir principalmente cuando el material se somete a esfuerzos mecánicos que superan su rango elástico, o cuando el material está sometido a temperaturas promedio en su área de trabajo y tienen un desgaste normal en cuanto a la oxidación del material.

Por lo tanto las variables que originan el daño de un elemento pueden llegar a ser muy complejas; sin embargo este se presenta principalmente por efectos de esfuerzos mecánicos a los que se someten los elementos; a continuación se en lista los posibles agentes que conllevan al daño en un elemento de concreto.

4.4.1 Causas del Daño en el Concreto

El concreto aunque es un material muy durable y resistente; presenta daños debido principalmente a sobreesfuerzos o fatiga del material, sin embargo existen otros factores que afectan directamente al elemento, ocasionando que el mismo disminuya su resistencia y por lo tanto el elemento se debilite; por ejemplo el ataque por sulfatos o por reacción álcalis-agregado; también ocasionan que el concreto se fisure y por lo tanto acelera el proceso de deterioro del elemento (Instituto Torroja, 2014).



Imagen 1. Causas del deterioro y daño del Concreto; a la izquierda elementos con deterioro por Sulfatos, a la derecha elementos deteriorados por reacción álcali-agregado. Tomado de (Instituto Torroja, 2014).

Igualmente el concreto es un material que tiene permeabilidad, debido a su gran contenido de poros (es por esto que en otros países se le da el nombre de hormigón) en algunas ocasiones el agua ingresa a los poros del concreto exponiéndolo al ataque de sustancias agresivas o al congelamiento de la misma que finalmente conlleva al daño de los elementos.

Por lo tanto se considera que un elemento tiene daño cuando presenta fisuras y desgaste, esto genera debilitamiento y posiblemente colapso posterior en la estructura. El uso de

métodos ultrasónicos permite medir el daño de los elementos dependiendo del grado de fisuras que tenga; esto se debe a que la velocidad de onda en el concreto varía y por lo tanto se puede cuantificar el daño del mismo.

4.4.2 Daño crítico y fractura

Como se había establecido anteriormente, el daño se presenta cuando el elemento empieza a fisurarse, dándose descohesión interatómica (Lemaitre, 2009). Si se analiza los esfuerzos axiales en un elemento, el daño se define con la siguiente ecuación:

$$D_c = 1 - \sigma_u / \tilde{\sigma}_u$$

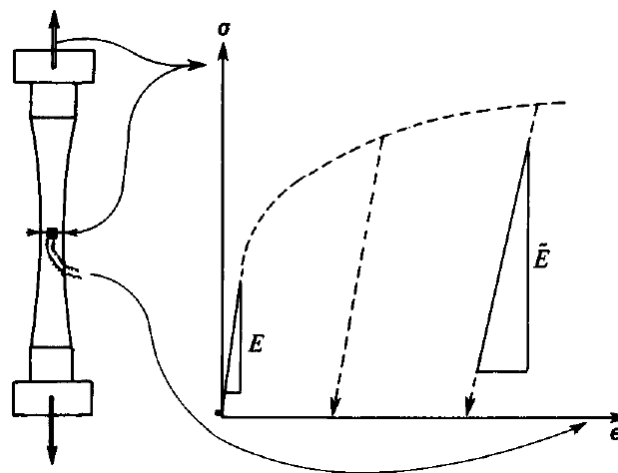
Ecuación 4

Donde D_c = Daño; σ_u = Esfuerzo uniaxial en la fractura del material; $\tilde{\sigma}_u$ = Esfuerzo último en la fractura del elemento. Según (Lemaitre, 2009) el orden del daño en un elemento se dará entre 0,5 – 0,9; de esta misma manera se puede establecer que el módulo elástico varía cuando el material presenta daño; esto se puede evaluar con la siguiente ecuación:

$$D_c = 1 - \tilde{E} / E$$

Ecuación 5

Donde \tilde{E} = Módulo elástico del material en su fractura y E = módulo elástico del material. La forma de calcular estos módulos se muestra Gráfica 9.



Gráfica 9. Interpretación de módulos elásticos. Fuente (Lemaitre, 2009) página 353.

Igualmente el daño se puede evaluar midiendo la velocidad de propagación de la onda sonora en el elemento, con respecto al módulo elástico, según (Lemaitre, 2009) se puede calcular el daño del elemento con técnicas de medición del pulso ultrasónico de la siguiente manera:

$$D_c = 1 - \tilde{V}_L^2 / V_L^2$$

Ecuación 6

Donde \tilde{V}_L = Velocidad de onda en la fractura del elemento; V_L = Velocidad de propagación de onda en el material sin daño.

De esta manera se puede medir el daño de un elemento y de acuerdo a esto, determinar ecuaciones que permitirán conocer la evolución del daño del concreto conforme a la velocidad de onda.

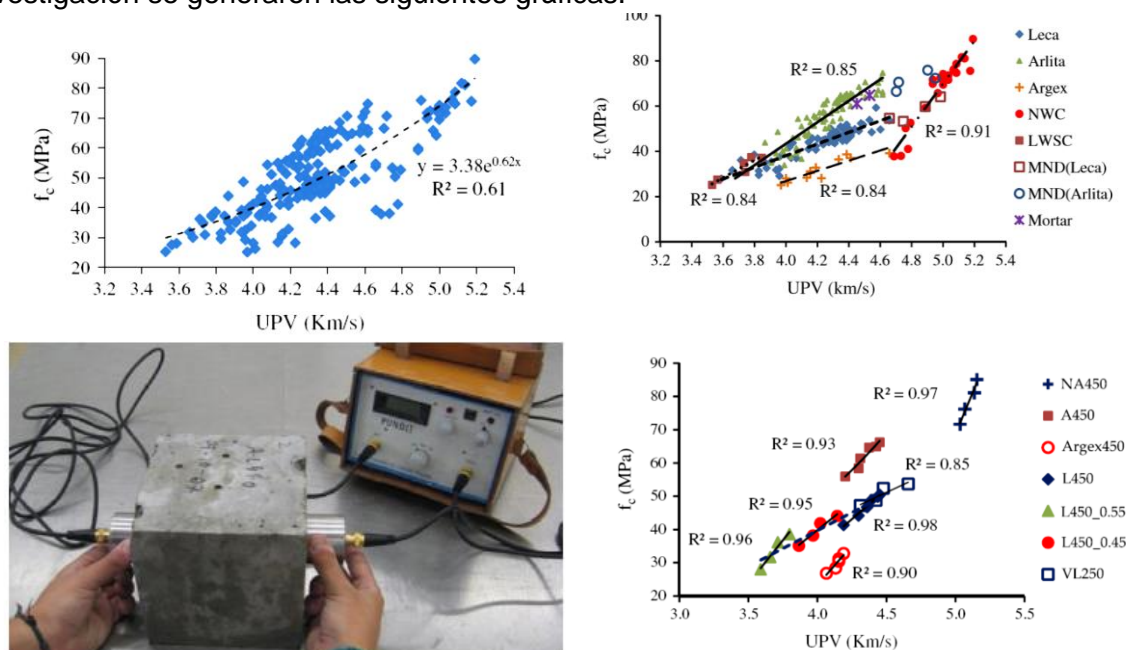
4.5 Ensayos no destructivos

Sobre la aplicación de ensayos no destructivos, hay una investigación realizada por Bogas, Gómez y Gómez sobre la resistencia a la compresión del concreto de bajo peso mediante el empleo de la medición del pulso ultrasónico (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013) en la cual se evaluaron concretos de bajo peso y se compararon con la velocidad de pulso ultrasónico. En éste proyecto se evaluaron 84 diferentes compuestos ensayados entre 3 y 180 días de edad, obteniendo resistencia de 30 MPa a 80 MPa.

Este análisis permite determinar valores de resistencia del concreto de acuerdo con la velocidad del pulso ultrasónico, estableciendo que dicha propiedad depende de la densidad y la elasticidad del concreto, definiendo una ecuación, que a su vez permite correlacionar la resistencia del concreto con la velocidad del pulso ultrasónico.

Definiendo, la velocidad de pulso ultrasónico en el concreto es afectada por parámetros tales como, el tipo de agregado (el cual afecta el módulo elástico), condiciones de curado de la mezcla, composición de la mezcla, relación agua material cementante, edad del concreto y contenido cementante.

La Ecuación 6 permite determinar la velocidad del pulso ultrasónico de manera aproximada, igualmente dicha ecuación deberá ajustarse para cada tipo de concreto que se esté evaluando, principalmente al tipo de agregado, esto puede ocasionar variación significativa en esta propiedad y aumentar la incertidumbre de la misma. De esta investigación se generaron las siguientes gráficas:



Gráfica 10. Diagramación de resultados en la comparación de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia del Concreto. Fuente: (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013)

De lo anterior, los autores desarrollaron el siguiente juego de ecuaciones, las cuales dependiendo del tipo de agregado se puede interpretar la resistencia del elemento, esto se muestra a continuación:

$$\text{Agregado Arlita : } f_{cm} = 1,07 \times e^{0,92 \cdot UPV}; R^2 = 0,82$$

$$\text{Agregado Leca : } f_{cm} = 3,0^{0,63 \cdot UPV}; R^2 = 0,82$$

$$\text{Argex : } f_{cm} = 1,65 \times e^{0,70 \cdot UPV}; R^2 = 0,82$$

$$\text{Agregado común : } f_{cm} = 0,023 \times e^{1,6 \cdot UPV}; R^2 = 0,88$$

Ecuación 7

De este artículo se concluye que la velocidad de pulso ultrasónico varía de acuerdo a la resistencia del elemento a evaluar y su densidad; por lo tanto al emplear agregados

ligeros la velocidad del pulso ultrasónico disminuye significativamente, es por esto que se presenta varias ecuaciones de acuerdo con la situación.

Igualmente la relación a/mc influye de manera inversamente proporcional en la medición del pulso ultrasónico, de tal manera que a mayor a/mc menor será la velocidad del pulso ultrasónico. Contradictoriamente los investigadores establecen que no presentaron variación en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico al variar el tipo de cemento, ni el fabricante del mismo (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013).

Asimismo los investigadores Rómel G. Solís Carcaño, Eric Iván Moreno y William R. Castillo Pak (Carcaño, 2004) estudiaron la predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados, cuyo objetivo principal de la investigación es encontrar las variables que afectan la medición de la velocidad de pulso ultrasónico para lo cual tuvieron en cuenta lo siguiente; la fuente de origen de los agregados, la relación A/mc y la relación entre grava y arena.

Para el desarrollo de éste proyecto, se utilizaron 6 tipos diferentes de agregados variando la relación grava-arena de la siguiente manera; 60% - 40%, 55% - 45%, 50% - 50%, y 45% - 55%, asimismo en cada una de estas mezclas se emplearon 4 diferentes relaciones de A/mc (0.4, 0.5, 0.6 y 0.7) con la finalidad de cubrir las mezclas típicas realizadas en la zona en donde se realizó la investigación (ciudad de Mérida, México), estas dosificaciones se realizan para cubrir el rango de posibilidades más amplio de los diseños de mezclas de concreto que existen en la zona, la cantidad de cemento se mantuvo constante. En total se evaluaron 96 mezclas de concretos diferentes y 288 cilindros de concreto.

A los 28 días de edad, se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión y medición de la velocidad de pulso ultrasónico, encontrando que entre mayor sea la resistencia a la compresión del concreto, mayor será la velocidad de onda, igualmente esto se debe a que los concretos que dieron mayor resistencia tenían mayor densidad, en la Figura 14 se muestran estos resultados.

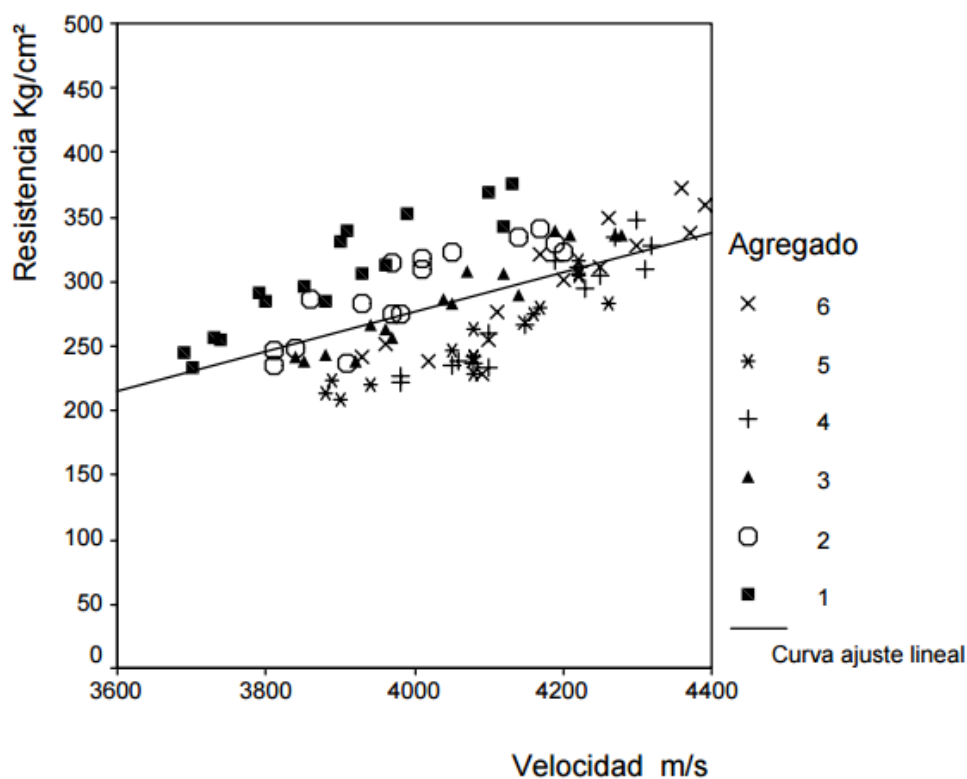
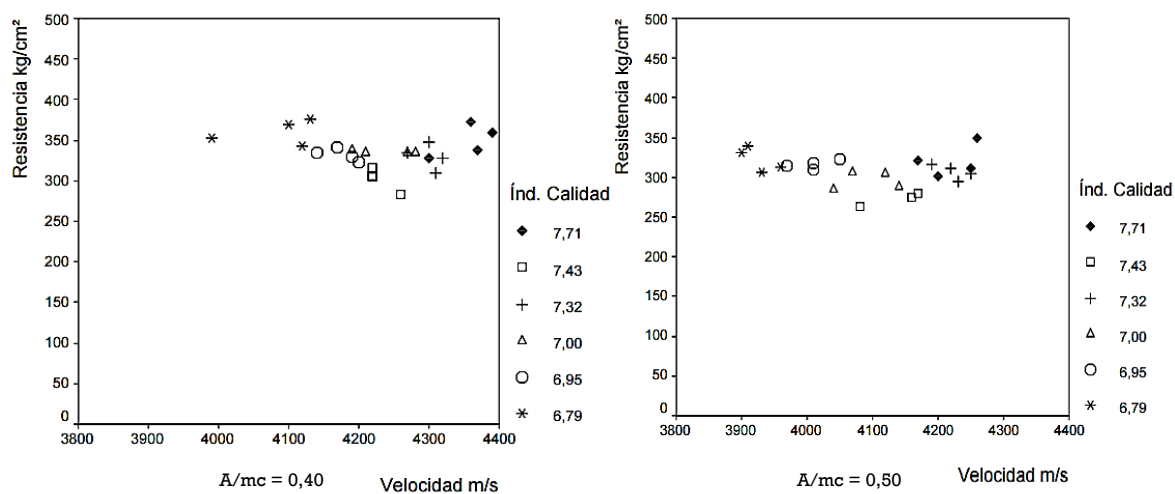


Figura 14. Gráfica de resistencia a la compresión versus UPV para los 6 tipos de agregados evaluados. Tomado de: (Carcaño, 2004) página 47.

Igualmente la relación a/mc tiene influencia tanto en la velocidad de pulso ultrasónico como en la resistencia a la compresión, si se observan las gráficas de la Figura 15, a mayor relación a/mc menor es la resistencia a la compresión de los elementos, así como la medición de la velocidad de pulso ultrasónico.



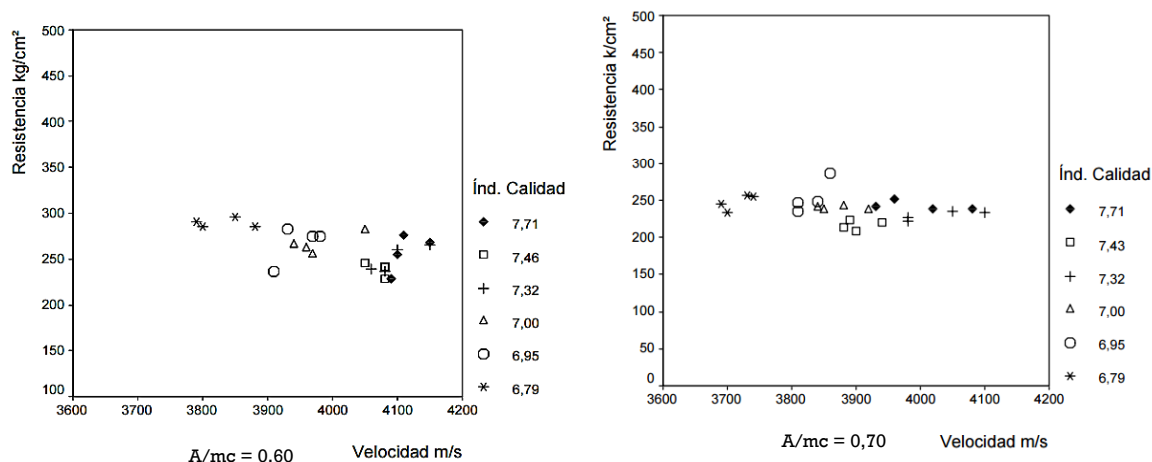


Figura 15. Gráficas de la resistencia a la compresión versus la relación a/mc . Tomado de: (Carcaño, 2004) página 49.

De la misma manera los autores del artículo, establecen que el mejor modelo para pronosticar la velocidad, será en función de la cantidad de agua por metro cubico de concreto (A), el índice de calidad (IC) de los agregados (los cuales están al lado de cada gráfica) y la velocidad de pulso ultrasónico (V), esto se presenta en la Ecuación 8.

$$R = 0,25 V - 33,058 IC + 1,795 A - 904,35 \text{ Ecuación 8}$$

Igualmente de esta investigación se demuestra que a pesar que los agregados sean de orígenes similares y aspectos parecidos se afecta la resistencia mecánica del concreto; adicionalmente que en una mezcla de concreto la velocidad de pulso se encuentra entre 4000 m/s y 4200 m/s; está velocidad depende directamente de la densidad de los agregados y del concreto.

En otra investigación es realizada por Luz Quintero, Julián Herrera, Laura Corzo y Johana García (QUINTERO ORTÍZ, 2011) se evaluó la resistencia a la compresión y la porosidad en muestras de concreto mediante el empleo de la medición de la velocidad del pulso ultrasónico; en esta investigación se establece que la porosidad en una mezcla de concreto influye de manera determinante en la relación a/mc sobre un mezcla; esto se muestra en Figura 16, por lo cual se evaluaron 12 probetas en cada una de las siguientes relaciones a/mc : 0,45, 0,50, 0,55 y 0,6. A estas probetas se les realizaron pruebas de

resistencia a la compresión, ensayos de porosidad y medición de la velocidad de pulso ultrasónico.

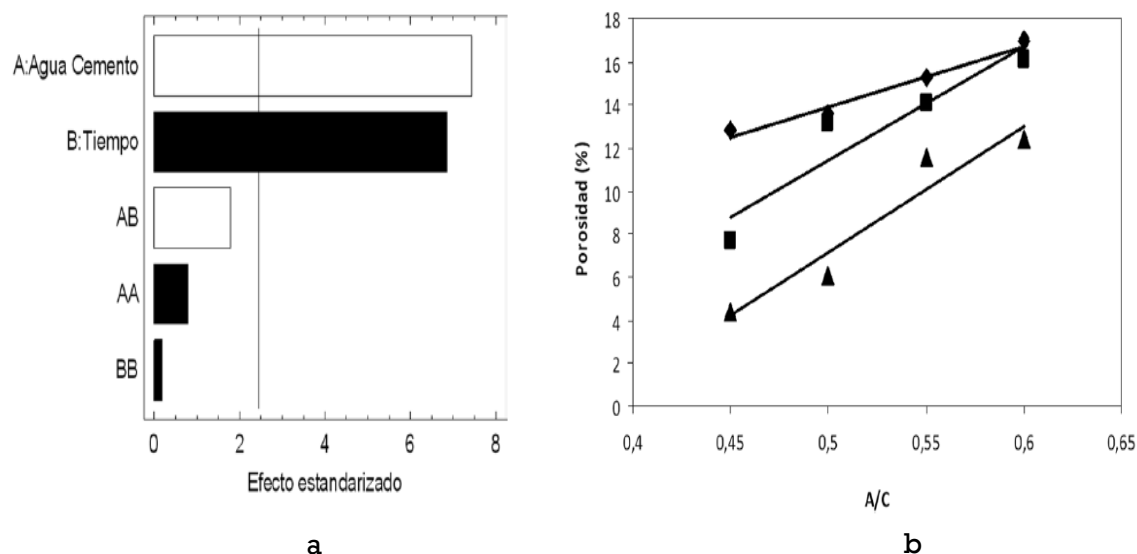


Figura 16. a. Diagrama de Pareto estandarizado en la porosidad b. Comportamiento de la porosidad en función de la relación a/mc para los respectivos días de curado; día 7 (◊), día 14 (▪) y día 28 (Δ) . Tomado de: (QUINTERO ORTÍZ, 2011) página 73

De los ensayos realizados se establece que entre mayor sea la relación a/mc mayor será la porosidad del material (QUINTERO ORTÍZ, 2011) y asimismo se disminuye la resistencia a la compresión, según los autores del artículo esto se debe a que a mayor relación a/mc, se genera mayor capilaridad en la mezcla de concreto y por lo tanto aumenta la cantidad de espacios vacíos dentro de la misma (QUINTERO ORTÍZ, 2011), para lo cual se debe realizar un excelente curado de las muestras con la finalidad de disminuir éste fenómeno.

En cuanto a la medición de la velocidad del pulso ultrasónico, esta se disminuye al incrementar la relación a/mc, algo que también obtuvieron en el estudio de Carcaño, Moreno y Pak (Carcaño, 2004) y en el estudio de bogas, goméz y goméz (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013), resumidos anteriormente en éste trabajo. Dichas investigaciones llegan a la misma conclusión y es que esto sucede debido al aumento en la porosidad del concreto y por lo tanto en la disminución de su densidad. Estos resultados se muestran en Figura 17

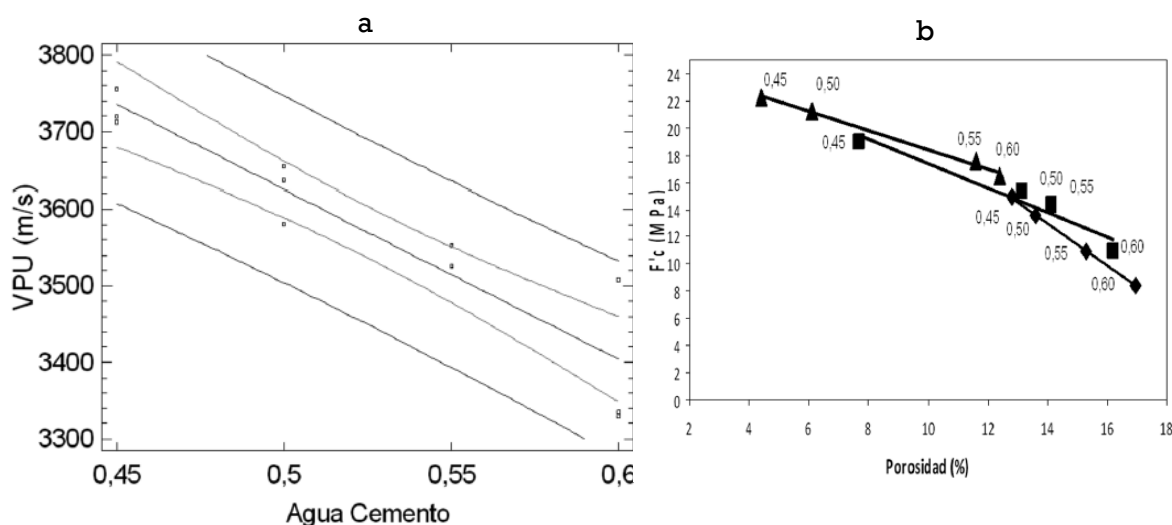


Figura 17. a. gráfica de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico versus relación agua cementante. b. Gráfica de la resistencia a la compresión versus porosidad del concreto. Fuente: (QUINTERO ORTÍZ, 2011) página 74.

En éste proyecto investigativo, Quintero y otros concluyen que el modelo entre la velocidad de pulso ultrasónico y la relación a/mc, establece que a mayor relación a/mc menor será la velocidad de pulso ultrasónico. Esto mismo sucede en la resistencia a la compresión de los elementos fabricados en concreto (QUINTERO ORTÍZ, 2011); por lo tanto las técnicas de medición del pulso ultrasónico dependiendo del valor obtenido y la tendencia en comparación con otros elementos en concreto, permite tener una idea del estado en el que se encuentra el concreto, entre menor sea la velocidad de pulso ultrasónico obtenida, mayor será la porosidad del concreto, igualmente entre mayor sea la velocidad medida de pulso ultrasónico, mayor será la resistencia a la compresión del concreto. Los autores del artículo obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$F_c = 27,6368 - 1,01657 \times \text{porosidad}$$

Donde: F_c = Resistencia a la compresión del concreto

Ecuación 9

$$VPU = 472,81 - 2207,51 \times \frac{\text{agua}}{\text{material cementante}}$$

Donde: VPU = Velocidad de pulso ultrasónico

Ecuación 10

Estas ecuaciones permitirán realizar una aproximación del comportamiento del concreto empleando técnicas de medición de la velocidad de pulso ultrasónico. Y con esto ver el estado en el que se encuentra un elemento en concreto (QUINTERO ORTÍZ, 2011).

5 METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó en tres fases, ejecutándose de acuerdo a como se avanzaba en la ejecución del proyecto y en los ensayos de laboratorio como principal eje del proyecto.

Para obtener resultados confiables y cumplir con el objetivo planteado en este trabajo, se realizaron 24 ensayos de caracterización física y mecánica de los materiales usados en el que van desde la caracterización de los agregados hasta las pruebas de flexión del concreto. Para la ejecución de estos ensayos se tuvo en cuenta la instrumentación empleada, con la finalidad de lograr una adecuada medición y adquisición de los datos obtenidos implicando desarrollar algunas piezas e idear formas para calibrar equipos que no son comunes, con la finalidad que la instrumentación se encontrará perfectamente instalada en cada probeta y adicionalmente para que la medición y adquisición de datos fuera lo más acertada posible.



Imagen 2. Resumen de registro fotográfico de los ensayos de caracterización física y mecánica de los materiales que intervienen en la mezcla SFRC; a. Mezcla SFRC en estado fresco; b. Prueba de asentamiento; c. Ensayo de tensión indirecta con sistema de sujeción del palpador; d. ensayo de compresión simple; e. Ensayo de flexión y muestra de equipo de adquisición de datos; f. fibras de acero empleadas. Fuente: El autor.

Igualmente y debido a la complejidad de la caracterización física y mecánica de los materiales, los ensayos de laboratorio se dividieron en tres fases; en la primera fase se realizó una caracterización de los materiales que intervienen en la mezcla de concreto, la segunda fase se realizaron ensayos de control de calidad al concreto en estado fresco y en la última fase se desarrollaron los ensayos de caracterización del comportamiento

mecánico y medición de la velocidad de pulso ultrasónico; a continuación se hace una descripción de las tres fases del proyecto.

5.1 PRIMERA FASE

En la primera fase del proyecto se realizaron ensayos de caracterización de los agregados, para realizar un diseño de mezcla adecuado y así obtener una alta resistencia a la compresión y módulo de ruptura del concreto, incluso en el concreto sin refuerzo.

Por lo tanto para la caracterización de los materiales se realizaron los siguientes ensayos, bajo criterios de las normas técnicas colombianas.

1. DENSIDAD DEL CEMENTO NTC 221
2. FINURA DEL CEMENTO NTC 33
3. ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE LOS AGREGADOS NTC 77
4. DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO NTC 237
5. MASA UNITARIA DE LOS AGREGADOS NTC 92

Los resultados de la caracterización de los materiales en resumen fueron los siguientes.

5.1.1 Cemento

El cemento escogido para realizar las probetas de ensayos; es de marca Cemex de uso general, para el cual fue necesario realizar una caracterización básica para la realización del diseño de mezcla, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6

De la misma manera en la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos aplicando las normas referentes para cada ensayo, sin embargo Tabla 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Si se comparan estos resultados con las especificaciones que establece la norma NTC 121 “Especificaciones para el desempeño para Cemento Hidráulico” permite establecer que este cemento cumple en cuanto a su densidad y finura. En la Tabla 6 se comparan los resultados con lo establecido por la NTC 121.

*Tabla 6. Resumen de los resultados obtenidos en la caracterización del cemento a emplear en el proyecto.
Fuente: El Autor.*

CARACTERÍSTICA	RESULTADO OBTENIDO	ESPECIFICACIÓN
<i>Finura del Cemento</i> (NTC 33)	4144 cm ² /g	Min 2800 cm ² /g
<i>Densidad del Cemento</i> (NTC 221)	2,91 g/cm ³	Para cemento con adiciones la densidad ronda entre 2,80 g/cm ³ a 3,00 g/cm ³

5.1.2 Agregados

Los agregados empleados en el proyecto son de origen sedimentario disponible en el mercado, de uso común en las construcciones de la ciudad de Bogotá, estos agregados tienen textura rugosa y se lavaron por el tamiz 200, para eliminar impurezas antes de realizar la mezcla de concreto del proyecto.

Igualmente a éste material se realizó una caracterización física, a continuación se realiza un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los agregados, las tablas de resultados se anexan al final del documento; estos son los siguientes:

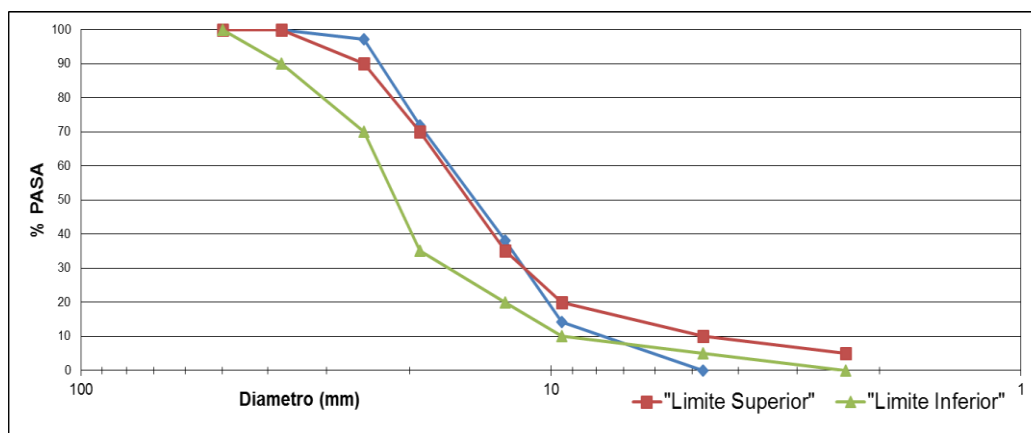
Tabla 7. Tabla resumen de los resultados obtenidos para el Agregado grueso. Fuente el autor.

CARACTERÍSTICA	RESULTADO OBTENIDO
<i>Tamaño Máximo</i>	1 ½"
<i>Tamaño máximo nominal</i>	1"
<i>Densidad aparente</i>	2,54 g/cm ³
<i>Densidad aparente saturada y superficialmente seca</i>	2,60 g/cm ³
<i>Densidad nominal</i>	2,69 g/cm ³
<i>Absorción</i>	2,1%
<i>Masa unitaria</i>	1589 kg/m ³
<i>Masa unitaria SSS</i>	1622 kg/m ³
<i>%Vacíos</i>	41%

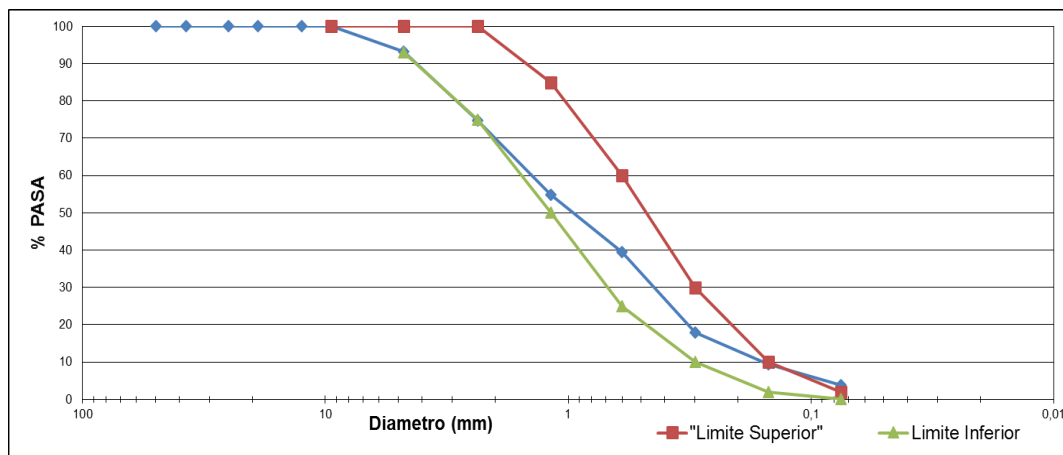
Tabla 8. Tabla resumen de los resultados obtenidos para el Agregado fino. Fuente el autor.

CARACTERISTICA	RESULTADO OBTENIDO
Módulo de finura	3,1
Densidad aparente	2,51 g/cm ³
Densidad aparente saturada y superficialmente seca	2,56 g/cm ³
Densidad nominal	2,65 g/cm ³
Absorción	2,1%
Masa unitaria	1 574 kg/m ³
Masa unitaria SSS	1 622 kg/m ³
% Vacíos	41%

Las gráficas granulométricas del material se muestran a continuación.



Gráfica 11. Curva granulométrica del agregado grueso empleado en el trabajo, comparado con las especificaciones dadas por la norma NTC 174. Fuente: El Autor.



Gráfica 12. Curva granulométrica del agregado fino empleado en el trabajo, comparado con las especificaciones dadas por la norma NTC 174. Fuente: El Autor.

Con los datos obtenidos se establece que el material cumple con los requisitos de la NTC 174 “Especificaciones de los agregados para concreto”, ver Gráfica 11 y Gráfica 12, en la cual se muestra como los agregados están dentro de los límites granulométricos dichos en la especificación anterior. De la misma manera se obtuvo una densidad de los agregados la cual se encuentra entre $2,5 \text{ g/cm}^3$ hasta $2,6 \text{ g/cm}^3$, asimismo la masa unitaria de los agregados está entre 1500 kg/m^3 hasta 1650 kg/m^3 .

5.2 SEGUNDA FASE

Para la segunda fase, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se realizó un diseño de mezcla bajo las recomendaciones de la ACI 211, empleando los factores de seguridad dados por la NSR 10¹⁷ título C. A continuación se hace una explicación de éste diseño.

5.2.1 Diseño de mezcla de concreto

Para el proyecto se realizó un concreto de alto desempeño a flexión y una resistencia promedio a la compresión, con la finalidad de obtener valores de desempeño cercanos al uso común del concreto estructural. Adicionalmente para la mezcla del concreto, se utilizó una mezcladora con una capacidad de $0,2 \text{ m}^3$, cumpliendo con las condiciones establecidas en la NSR 10 título C.



Imagen 3. Mezcla de concreto en estado fresco. Fuente: El Autor

¹⁷ Norma sismo resistente colombiana 10 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010)

La resistencia a la compresión escogida para el concreto fue de 28 MPa; el módulo de rotura de 4,23 MPa, (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010) misma resistencia a la tensión del concreto (estos parámetros se obtuvieron aplicando la ecuación recomendada por la NSR título C la cual es $M.R. = 0,8\sqrt{f'c}$).

Para determinar la manejabilidad de la mezcla de concreto, se empleó una mezcla de alta plasticidad (P. Paultre, 2010), escogiendo un asentamiento de 200 mm. Con la finalidad de no aumentar la relación A/mc¹⁸ se empleó un super-plástificante.

De la misma manera, para la dosificación de los componentes participantes en la mezcla, se emplearon como base los criterios establecidos por la norma para la selección de las proporciones para concreto de peso normal y alto ACI 211.1 y criterios establecidos en los libros de tecnología del concreto de Diego Sánchez de Guzman (Guzman, 2001), estas dosificaciones se explican a continuación.

Dosificación de componentes participantes en la mezcla de Concreto

Los criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño de mezcla se encuentran en la Tabla 9.

Tabla 9 Criterios escogidos para el diseño de la mezcla de concreto. Fuente: El autor

Criterio	Dato
Resistencia a la Compresión de diseño	28 MPa
Módulo de Rotura y Tensión	4,23 MPa
Asentamiento	8 in o 200 mm aprox.
Densidad del cemento	2,91 g/cm ³
Tamaño Máximo del Agregado	11/2 in o 38,1 mm
Tamaño Máximo Nominal del agregado	1 in o 25,4 mm
Masa unitaria Agregado Grueso	1 589 kg/m ³
Masa unitaria Agregado Fino	1 574 kg/m ³
Densidad Agregado Grueso	2 540 kg/m ³

¹⁸ A/mc: Relación agua material cementante.

Densidad Agregado Fino	2 510 kg/m ³
Módulo de finura	3,1
Tipo de Control del concreto en obra	Bueno

Con estos datos se diseña la mezcla de concreto. En primera instancia se calculó la resistencia para su empleo en la dosificación del concreto, esta se obtiene de la siguiente ecuación (tomado de NSR 10 título C tabla C.5.3.2.2):

$$f'_{cr} = f'_c + 7$$

Ecuación 11

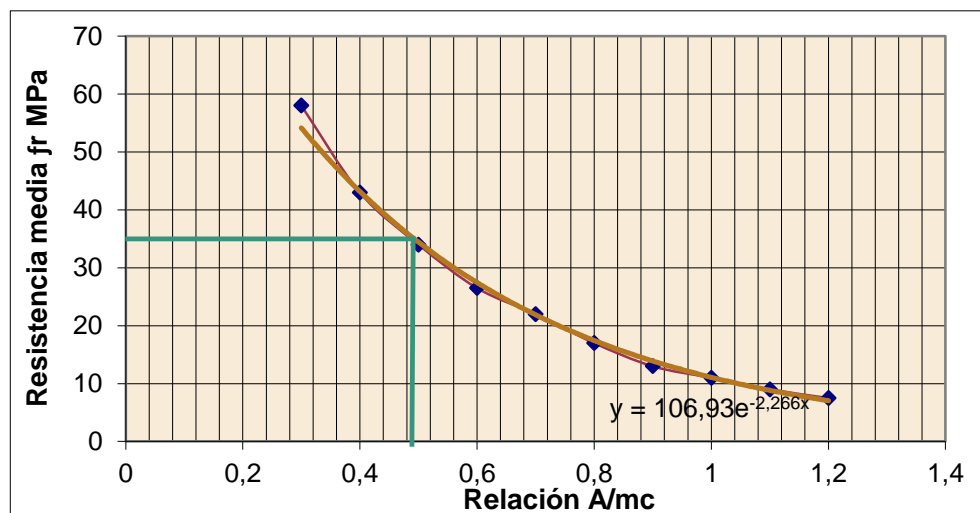
Se escoge esta ecuación debido a que dicha mezcla se elabora sin obtener datos históricos de otras mezclas similares y por lo tanto en la NSR 10 título C capítulo C.5.3.2.2 establece que para resistencias menores a los 35 MPa, se debe emplear la Ecuación 11; obteniendo el siguiente resultado:

$$f'_{cr} = 28 \text{ MPa} + 7 \text{ MPa}$$

$$f'_{cr} = 35 \text{ MPa}$$

Ecuación 12

Una vez obtenida la resistencia requerida se procede a escoger la cantidad de agua necesaria para el diseño de mezcla; se debe tener en cuenta el empleo de un superplastificante; en la tabla 19.4 del libro de tecnología del concreto del autor Adam Neville (Neville, 2010), se obtiene que la cantidad de agua por m³ es de 205 kg. Se debe tener en cuenta que la resistencia para realizar el diseño de mezcla fue de 35 MPa ó 350 kg/cm², con este dato y la Gráfica 13 se obtiene la relación A/mc adecuada para la mezcla.



Gráfica 13. Correlación para determinar la relación A/mc. Basado en la tabla 19,1 (Neville, 2010)

Por lo tanto y analizando la Gráfica 13, la relación A/mc adecuada para la mezcla es de 0,48, despejando la ecuación de A/mc se obtiene la cantidad de cemento en la mezcla:

$$\frac{A}{mc} = 0,48 \rightarrow mc = \frac{A}{0,48} \rightarrow mc = \frac{205 \text{ kg}}{0,48} \rightarrow mc = 426 \text{ kg}$$

Ecuación 13

De esta manera; solo hace falta calcular la cantidad de agregados que se necesitan para la mezcla. De la tabla 11.6 del libro tecnología del concreto y del mortero (Sanchez de Guzmán, 2001) se obtiene la cantidad de agregado grueso, teniendo en cuenta el módulo de finura del agregado se obtiene la cantidad de agregado fino y el tamaño máximo del agregado que se necesita para la mezcla.

Igualmente de la tabla 11.6 del libro tecnología del concreto y del mortero (Sanchez de Guzmán, 2001) se obtiene que para la mezcla es necesario 0,63 m³ de agregado grueso en 1 m³ de concreto; teniendo en cuenta que la masa unitaria del agregado grueso es de 1 589 kg/m³; se despeja la fórmula de masa unitaria y se obtiene la cantidad en peso del agregado grueso. Esto da lo siguiente:

$$M.U = \frac{mag}{V} \rightarrow M.U \times V = M \rightarrow M = 0,63 \text{ m}^3 \times 1\,589 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$$

$$mag = 1001,07 \text{ kg para un m}^3 \text{ de Concreto}$$

Ecuación 14

Una vez obtenida la cantidad de masa del agregado grueso, queda por calcular la cantidad necesaria del agregado fino, teniendo en cuenta las demás cantidades obtenidas anteriormente para los otros materiales, se realizan los siguientes cálculos:

Se calcula el volumen de cemento participante en 1 m³ de concreto; realizando el siguiente cálculo:

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{mc}{\delta c} \rightarrow \delta c = 2\,910 \text{ kg/m}^3 \text{ y } mc = 426 \text{ kg} \rightarrow$$

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{426 \text{ kg}}{2\,910 \text{ kg/m}^3} = 0,146 \text{ m}^3;$$

Ecuación 15

Igualmente se realiza la misma metodología para el cálculo de la cantidad de agua participante, para 1 m³ de concreto.

$$\text{Volumen de agua} = \frac{ma}{\delta a} \rightarrow \delta a = 1\,000 \text{ kg/m}^3 \text{ y } ma = 205 \text{ kg} \rightarrow$$

$$\text{Volumen de agua} = \frac{205 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0,205 \text{ m}^3$$

Ecuación 16

De la misma manera se realiza el cálculo del volumen de agregado grueso; teniendo en cuenta la densidad del mismo, el cuál fue el siguiente:

$$\text{Volumen de Agregado Grueso} = \frac{mag}{\delta ag} \rightarrow \delta ag = 2\,540 \text{ kg/m}^3 \text{ y } mag = 1\,001 \text{ kg} \rightarrow$$

$$\text{Volumen de Agregado Grueso} = \frac{1\,001,07 \text{ kg}}{2\,540 \text{ kg/m}^3} = 0,394 \text{ m}^3$$

Ecuación 17

Solo hace falta calcular el volumen de aire incluido en la mezcla de concreto, de la tabla C.4.4.1 de la NSR-10 se establece que es del 2% del total del concreto y cómo la mezcla se está diseñando para 1 m³; se realiza el cálculo siguiente:

$$\text{Volumen de aire atrapado} = 0,02 \times 1\text{m}^3 = 0,02 \text{ m}^3$$

Ecuación 18

Con esta información y teniendo en cuenta que la mezcla de concreto se está realizando para 1 m³; se calcula la cantidad de agregado fino necesario para la mezcla; para esto se emplea los resultados obtenidos anteriormente, restándoselos a 1 m³, la diferencia de la cantidad de agregado fino que se necesita para la resistencia especificada. Esto da lo siguiente:

$$\text{Volumen de Agregado Fino} = (1 - 0,146 - 0,205 - 0,394 - 0,02)\text{m}^3 \rightarrow$$

$$\text{Volumen de Agregado Fino} = 0,235 \text{ m}^3$$

Ecuación 19

Y aplicando la fórmula de densidad y despejando la masa del agregado se obtiene lo siguiente:

$$maf = \delta af \times Vaf = 2\,510 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,235 \text{ m}^3 = 589,85 \text{ kg}$$

Ecuación 20

Los datos obtenidos se resumen a continuación.

Tabla 10. Dosificaciones de cantidades de material para 1 m³ de concreto. Fuente: el autor

Material	Cantidad en kg	Volumen en m³/m³
Cemento	426	0,146
Agua	195	0,205
Agregado grueso	1 001,07	0,394
Agregado fino	614,95	0,235
Aire	0,00	0,02
Total	2237,02	1

Nótese que la cantidad de cemento empleada sigue las recomendaciones dadas por (Almansa Moreno & Cánovas Manuel, 1997); consistió en fabricar concretos reforzados con fibras de acero, con un contenido de material cementante que éste entre 300 kg/m^3 a 450 kg/m^3 , justificando que este rango no debe superarse debido a la afectación de emplear grandes cantidades de cemento en la durabilidad de la mezcla de concreto; por lo tanto si la relación de material cementante está por debajo, será necesario emplear otras adiciones, tales como el humo de sílice, para no afectar enormemente la resistencia (Almansa Moreno & Cánovas Manuel, 1997).

5.2.2 Cálculo de las cantidades optimas de fibras de acero para reforzar el concreto

Adicionalmente; se calcula la cantidad de materiales que complementará la mezcla de concreto. En primera instancia las fibras de acero, teniendo en cuenta que entre mayor sea la cantidad de fibras, mayor será la resistencia a la flexión y tensión del concreto (Song & Hwang, 2004). Para esto se tuvo en cuenta la dosificación de fibras recomendada por diferentes fabricantes (tales como SIKKA, TOXEMENT, ALMASA) que se encuentra entre 20 kg y 45 kg de fibras por cada m^3 de concreto, igualmente la NSR 10 en su título F numeral F.4.7.5.5. recomienda emplear mínimo 14,8 kg por cada m^3 en caso de tener losas de concreto sin compromiso estructural; no se especifica un contenido máximo de éstas fibras. Se puede esperar con esta adición de fibras, obtener un 30% de aumento en la resistencia a la flexión del concreto (Kumutha & Vijai, 2009).

Igualmente si se aumenta aún más la cantidad de fibras de acero en la mezcla de concreto habrá más aumento en su resistencia a la flexión. Según (Ding & Wolfgang, 1999) un límite de 60 kg por cada m^3 de concreto proporciona un aumento hasta de un 50% en la resistencia a la flexión. Sin embargo en la investigación realizada por (Ding & Wolfgang, 1999) no se comprobó si con más contenido de fibras podrá obtenerse mayor resistencia.

De la misma manera el “American Concrete Institute” en su comité 544.4 recomiendan no exceder 1,5 veces con fibras metálicas el peso del cemento (American Concrete Institute, 1999), porque una mezcla con éste contenido queda muy flexible y por lo tanto disminuye su resistencia a la compresión, es decir el concreto se vuelve más flexible pero menos

rígido afectando la resistencia a la compresión, obteniendo un comportamiento plástico; adicionalmente su costo es muy alto, siendo un desestimulo para emplear tantas fibras; para lo cual es mejor emplear barras de acero que tendrán un comportamiento similar (American Concrete Institute, 1999).

Por todo el análisis anterior, se decidió utilizar en el presente proyecto 3 porcentajes de fibras de acero para reforzar al concreto, la primera mezcla realizada en concreto sin fibras de acero, la segunda mezcla se escogió de acuerdo a la cantidad de fibras recomendadas por los fabricantes de fibras de acero, la cual es de 25 kg por m³ de concreto (SIKA, 2012) y una última mezcla de concreto con una cantidad muy alta de fibras de acero (Karadelis & Lin, 2015) con la finalidad de tener un extremo superior y observar el comportamiento de las ondas sonoras en éste tipo de mezclas; decidiendo que ésta mezcla fue de 70 kg por m³ de concreto.

Igualmente, si se calcula la cantidad de fibras de acero en términos de porcentaje con respecto a 1 m³ de concreto, teniendo en cuenta que se está diseñando una mezcla de concreto de peso normal con agregados de origen sedimentario (esperando una densidad de 2 237 kg/m³); se calcula la cantidad porcentual de fibras de acero con respecto a la cantidad de concreto; esto se consigue dividiendo el contenido de fibras en términos de kg/m³ por la densidad de las fibras (SIKA, 2012) y se multiplica por 100%.

Para esto se obtienen los siguientes resultados: Para la primera mezcla escogida 0%; para la segunda 0,32% y para la última 0,89%, asimismo se siguen las recomendaciones dadas por él (American Concrete Institute, 1999), (Almansa Moreno & Cánovas Manuel, 1997), (Karadelis & Lin, 2015) y (Mármol Salazar, 2010).

Con estos valores se desea hacer una predicción de la resistencia que se va obtener, empleando una serie de ecuaciones que permite predecir de manera aproximada, la resistencia a la flexión del concreto descrita por los autores (Song & Hwang, 2004); estas ecuaciones son las siguientes:

$$f_{sw} = 0,92f_w(1 - V_f) + 4,19V_fL_f/d_f$$

Ecuación 21

$$f_{sw} = 0,97f_w(1 - V_f) + 3,41V_fL_f/d_f$$

Ecuación 22

Donde:

f_{sw} = Resistencia a la flexión del concreto reforzado con fibras de acero

f_w = Resistencia a la flexión del concreto sin refuerzo.

V_f = Volumen de fibras de acero por m³ de concreto.

L_f/d_f = Relación longitud diámetro de las fibras de acero participantes como refuerzo del concreto.

De estas ecuaciones, se utilizó la Ecuación 22, desarrollada para concreto de densidad normal que para este caso es de 2 237 kg/m³, por lo tanto se cumple con la condición de la misma. Igualmente, se deben tener los siguientes datos; que se obtuvieron del catálogo de la hoja técnica de las fibras Sikafiber FE-530/35 GH usadas en éste proyecto; dicho catalogo muestra la siguiente información.

Tabla 11. Datos técnicos de las fibras Sikafiber FE-530/35 GH. Fuente. Hoja técnica Sikafiber FE-530/35 GH.

Descripción	Dato técnico
Longitud	35 mm
Diámetro de la fibra	0,53 mm – 0,54 mm
Relación largo/diámetro (L/d)	65
Resistencia a tracción	1200 MPa

Recordando que la resistencia esperada a la flexión es de 4,23 MPa, la relación de volumen de las fibras es de 0,032 m³ para la primera y 0,089 m³ en la segunda, se reemplaza los valores en la Ecuación 21 y Ecuación 22, consiguiendo lo siguiente:

$$f_{sw} = 0,97 \times 4,23 (1 - 0,032) + 3,41 \times 0,032 \times 65$$

$$f_{sw} = 11,06 \text{ MPa}$$

Ecuación 23. Ecuaciones aplicadas para un volumen de fibras del 0,32% ó 25 kg/m³, para hallar la resistencia a la flexión esperada del Concreto en la segunda mezcla.

$$f_{sw} = 0,97 \times 4,26 (1 - 0,032) + 3,41 \times 0,032 \times 65$$

$$f_{sw} = 23,50 \text{ MPa}$$

Ecuación 24. Ecuaciones aplicadas para un volumen de fibras del 0,89% ó 70 kg/m³, para hallar la resistencia a la flexión esperada del Concreto en la segunda mezcla.

Igualmente (Song & Hwang, 2004) proponen una ecuación que al igual que las anteriores permiten predecir la resistencia a la tensión del concreto reforzado con fibras, estas son las siguientes:

$$f_{st} = 0,94f_t(1 - V_f) + 3,02V_f l_f / d_f$$

Ecuación 25

De la misma manera la resistencia a la tensión esperada para el concreto simple es de 4,26 MPa; el resto de los datos son los mismos aplicados en la Ecuación 24; por lo tanto se procede a calcular la siguiente ecuación:

$$f_{st} = 0,94 \times (4,26 \text{ MPa}) \times (1 - 0,032) + 3,02 \times (0,032)(65)$$

$$f_{st} = 10,16 \text{ MPa}$$

Ecuación 26. Resistencia a la tensión esperada para la mezcla de 0,32% ó 25 kg/m³.

$$f_{st} = 0,94 \times (4,26 \text{ MPa}) \times (1 - 0,089) + 3,02 \times (0,089)(65)$$

$$f_{st} = 18,38 \text{ MPa}$$

Ecuación 27. Resistencia a la tensión esperada para la mezcla de 0,89% ó 70 kg/m³.

De esta manera se realiza una estimación de la resistencia que debe cumplir el concreto reforzado con fibras, a continuación se realiza una tabla resumiendo los datos encontrados:

Tabla 12. Resistencias esperadas para las diferentes mezclas de concreto realizadas en éste trabajo. Fuente: El autor.

Tipo de mezcla SFRC kg/m ³	Resistencia a la Compresión esperada (MPa)	Resistencia a la flexión esperada (MPa)	Resistencia a la tensión esperada (MPa)
0	28	4,23	4,23
25	28	11,06	10,16

70	28	23,50	18,38
----	----	-------	-------

Con estas ecuaciones se obtienen las resistencias esperadas a la tensión y flexión del concreto que se fabricará y se compararán en el capítulo de análisis de resultados; igualmente hace falta calcular la cantidad de material a fundir.

5.2.3 Cálculo de elementos a fabricar

Como se ha establecido anteriormente y para poder cumplir con el objetivo general del proyecto; es necesario producir probetas de concreto en forma de viga de sección cuadrada de 15 cm x 15 cm x 60 cm tal como se muestra en la Imagen 4 (Bernard & Xu, 2007), igualmente dichas vigas permiten cumplir los parámetros de la norma ASTM C 1609/ 1609M - 05 (American Standard Testing and Materials International, 2006).

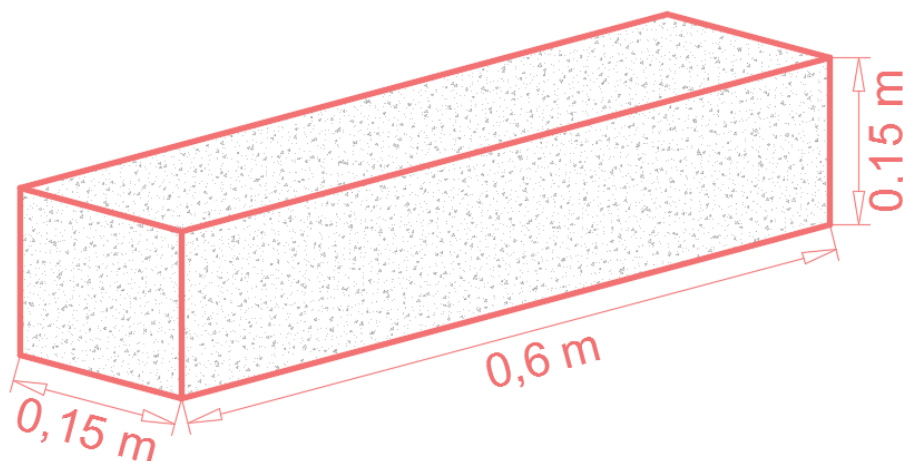


Imagen 4. Esquema de la viga a fabricar para la realización de los ensayos propuestos. Fuente el autor

Estas vigas son las más adecuadas, debido a que la norma ASTM C1609 y (Bernard & Xu, 2007) recomiendan instrumentar la viga de tal manera que permita medir la deflexión del elemento, esto se debe a que las fibras de acero están presentes en el concreto para mejorar su flexibilidad y por lo tanto es necesario conocer ésta deflexión. Para lo cual (Bernard & Xu, 2007) recomiendan instrumentar el equipo de ésta manera:

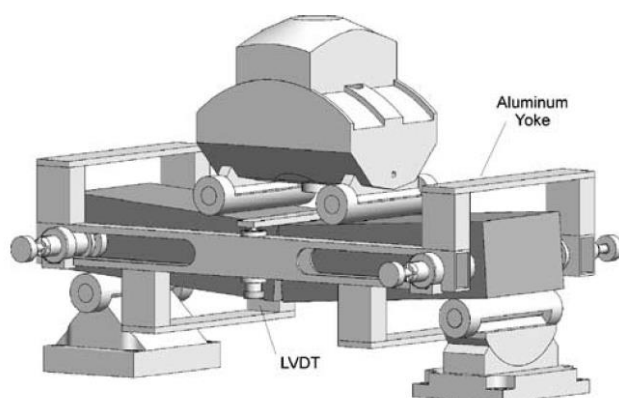


Imagen 5. Sistema para medición de la deformación en vigas de Concreto. Tomado de (Bernard & Xu, 2007) 3 p.

Igualmente, es necesario el diseño de un sistema que permita medir la deflexión en la viga y permita conectar un equipo de adquisición de datos, lo cual se explicará más adelante; es importante resaltar que este sistema funciona de manera adecuada con las vigas anteriormente mostradas.

Esto también es necesario para realizar ensayos de tensión indirecta bajo los criterios de la norma NTC 722. Se fundieron cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de alto, para mantener la relación de $L/D = 2$; con esto se puede representar de manera adecuada la evaluación del límite de falla de un material con la velocidad de pulso ultrasónico.

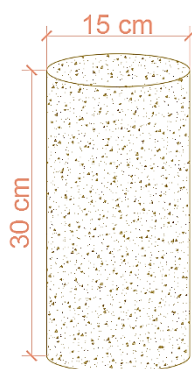


Imagen 6. Cilindro de concreto. Fuente el autor.

Similarmenete, hay que realizar los ensayos de control calidad al concreto fabricado para verificar su resistencia a la compresión, fabricando 6 cilindros de cada mezcla, se fallaron a compresión bajo los criterios de la NTC 673 y a tensión indirecta bajo los criterios de la norma NTC 722. Igualmente para la realización de los ensayos a flexión (ASTM-C-1018) se fabricaron 3 vigas para cada mezcla, es de aclarar que las probetas realizadas todas

se fallaron una vez cumplida la resistencia máxima del concreto; no se evaluaron más edades, debido a que el proyecto es para ver el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico con la resistencia a la flexión y el daño del concreto. En la Tabla 13, se muestra el resultado del cálculo de volúmenes:

Tabla 13. Cantidad de volúmenes a fundir. Fuente: Autor.

Ensayo	Mezcla	Cantidad	Volumen m ³
Módulo de ruptura	SFRC 0 kg/m ³ ,	9	0,1215
	SFRC 25 kg/m ³ ,		
	SFRC 70 kg/m ³		
Tensión Indirecta	SFRC 0 kg/m ³ ,	9	0,0477
	SFRC 25 kg/m ³ ,		
	SFRC 70 kg/m ³		
Compresión	SFRC 0 kg/m ³ ,	9	0,1215
	SFRC 25 kg/m ³ ,		
	SFRC 70 kg/m ³		
Desperdicio	10%		0,0291
	TOTAL		0,319

Con estas cantidades se procede a calcular las cantidades que se necesitan para el concreto, recordando, para los tres tipos de mezclas de fibras que se prepararon, se realizaron en una sola mezcla de concreto. Para esto se multiplica las dosificaciones halladas por el diseño de mezcla; por el volumen total de elementos a fundir, igualmente la cantidad de fibra se multiplicó cada dosificación por el volumen total a fundir. En la Tabla 14 se resumen los resultados.

Tabla 14. Dosificaciones de materiales para la mezcla de concreto a realizar. Fuente el autor.

Material	Cantidad en kg por m ³	Dosificación a fabricar
Cemento	426	136,23
Agua	205	62,36
Agregado Grueso	1 001,07	320,13
Agregado Fino	614,95	196,65

Aire	0,00	0
Volumen de fibras 25 kg/m ³	25	7,99
Volumen de fibras 70 kg/m ³	70	22,38
Total	2237,02	1

Adicionalmente, debido a recomendaciones del ACI 544.4 (American Concrete Institute, 1999), se empleó un superplastificante y autocompactante, debido a que el tiempo de mezclado es bastante alto y las fibras de acero afectan la manejabilidad de la mezcla de concreto. Según las recomendaciones del fabricante la dosificación es del 1% con respecto al peso del cemento.

5.2.4 Producción de las mezclas en estado fresco

Teniendo la dosificación anterior, se procede a la producción de las mezclas de concreto, en primera instancia se mezcló la primera cochada para realizar los ensayos de control de calidad del concreto en estado fresco (ver Imagen 7) y posteriormente a fundir los primeros elementos con una mezcla de fibras de 0, 25 y 70 kg/m³ (ver Imagen 8). Las normas utilizadas como referencia en los ensayos son la NTC 396 “Determinación del asentamiento para el concreto” y la NTC 1926 “Determinación de la masa unitaria del concreto”. En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 15. Resultados obtenidos en la realización de la mezcla de concreto en estado fresco. Fuente el autor

Característica	Unidad de medida	Valor
Masa Unitaria	g/L	2,31
Rendimiento	N/A	1,0
Rendimiento Relativo	N/A	1,0
Contenido de aire	%	1,5
Asentamiento	mm	200
Temperatura	°C	20

Los resultados fueron satisfactorios debido a que se encuentran dentro de los límites establecidos, normalmente las mezclas de concreto que contienen fibras de acero, tienen

un contenido alto de aire; sin embargo el obtenido fue de 1,5%, esto se debe al aditivo superplastificante y autocompactante que permitió reducir el porcentaje de vacíos. Al igual que el asentamiento del concreto el cual fue de 20 cm, generando una mezcla con una buena plasticidad.



Imagen 7. Registro fotográfico de las actividades para el aseguramiento de la calidad del Concreto. Fuente: El autor.

Inmediatamente después de realizar estos ensayos, se funden las probetas de ensayo, en éste caso se fundieron vigas y cilindros del concreto con 0 SFRC, luego se fundieron las probetas de la mezcla de 25 kg/m^3 y por último las probetas para la mezcla de 70 kg/m^3 , cabe resaltar que en la última mezcla la manejabilidad se redujo ostensiblemente y fue necesario emplear mayor energía de compactación.



Imagen 8. Registro fotográfico de los elementos fundidos en Concreto. Fuente el autor.

Una vez fundidas las probetas, estas se desmoldaron y se dejaron en un cuarto de curado a una humedad del 98% y temperatura de 23 °C; hasta cumplir una edad de 56 días.

5.3 TERCERA FASE

Una vez cumplida la edad del concreto; se procedió a realizar los ensayos de caracterización mecánica y medición de la velocidad del pulso ultrasónico; necesitando el diseño de un sistema para la medición de la deformación en vigas y el diseño de un sistema que permita sostener el generador y transductor (más conocidos como palpadores) del equipo de medición de pulso ultrasónico; esto con la finalidad de poder adquirir una buena cantidad de datos, permitiendo un adecuado almacenamiento de los mismos.

Sin embargo, al realizar la medición y adquirir el dato mediante una presión constante del generador y transductor del equipo Pundit (equipo de medición ultrasónica) en ensayos previos a los oficiales de éste trabajo de grado, se notó que la medición de la velocidad de pulso cambiaba a medida que se hacía más presión o menos del generador, lo ideal es hacer la mayor cantidad de presión posible y con esto se consigue mediciones muy similares.

5.3.1 Diseño de equipos de sujeción:

Teniendo en cuenta las recomendaciones realizadas por la ASTM C 1609 y (Bernard & Xu, 2007) basándose en la Imagen 5, se diseñó un sistema para la medición de la deflexión en vigas de sección de 15 cm x 15 cm y un largo de 60 cm; éste se muestra

Imagen 9.

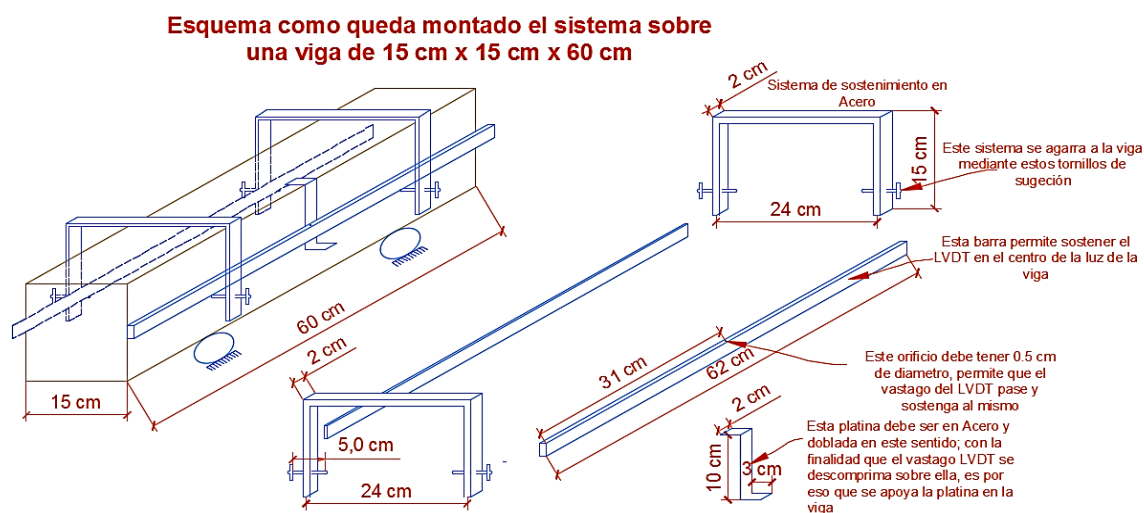


Imagen 9. Diseño del sistema para la medición de la deformación en vigas de concreto de 15 cm x 15 cm x 60 cm. Fuente el autor.

Éste elemento permitió sujetar los medidores de deflexión (LVDT) de tal manera que permitan medir exactamente la deflexión de la viga, esto se debe a que el elemento se sujeta en la viga y al fabricarse en acero tendrán una deflexión menor, por lo tanto la medición del LDT, será la deflexión de la viga.

De la misma manera para sostener el generador y transductor del equipo Pund It, se adapta dos bases magnéticas, sujetándolas al marco de flexión; a estas bases se le adaptaron unas almohadillas de neopreno que permitieron aplicar una fuerza constante del generador y transductor hacia la viga, igualmente cabe señalar que estos sensores tuvieron un gel que permite sellar herméticamente, el contacto entre viga y palpadores (cómo se conoce el generador y transductor del equipo Pund It). Esto se muestra en la Imagen 10.

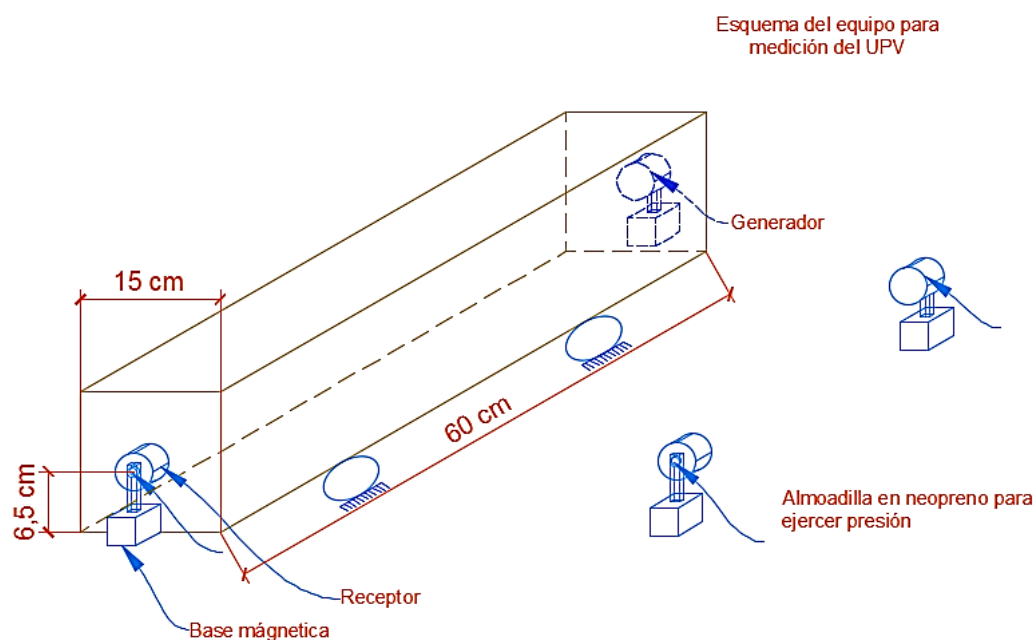


Imagen 10. Esquema para el montaje del Generador y Receptor del equipo Pund It. Fuente: el autor.

Igualmente para sostener el generador y transductor del equipo Pund it en un cilindro de concreto y con esto medir el comportamiento de la onda sonora en un elemento sometido a tensión, se diseñó un equipo de sujeción de tal manera que permitió que el generador y transductor se sostengan a una presión constante. Esto se diagrama en la Imagen 11.

De lo anterior, se construyeron con la empresa Maquilab S.A.S (empresa dedicada a la fabricación de elementos mecánicos de cualquier tipo) la fabricación de estos elementos.

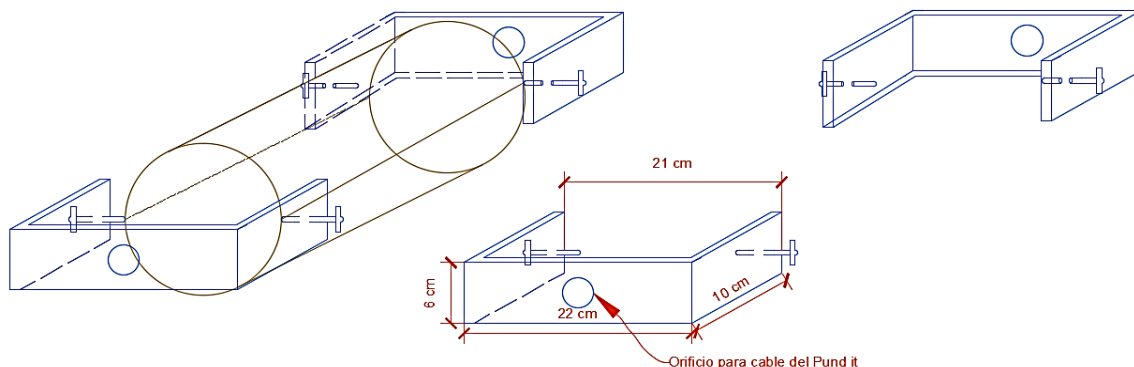


Imagen 11. Diseño de equipo de sujeción para generador y transductor del equipo Pund It. Fuente el Autor.

5.3.2 Calibración de equipos

Para medir la deflexión de los elementos fabricados que se sometieron a esfuerzos mecánicos, se recurrió al uso de una prensa de concretos con instrumentación y equipos de adquisición de datos que midieran la deformación en las vigas elaboradas en concreto, se empleó una prensa de concretos marca Controls modelo MC 8 con un sistema de adquisición de datos de la misma empresa, prestada por la Universidad Militar Nueva Granada en convenio con la Universidad Nacional de Colombia.



Imagen 12. Tornillo micrométrico digital para ajuste de LDT. Fuente el Autor.

Para buscar un correcto funcionamiento de la prensa, fue necesario colocarla a punto con equipos de medición metrológica, para esto se emplearon transductores tipo LDT Controls

(del mismo fabricante de la prensa) mostrados en la Imagen 12, los cuales se verificaron y ajustaron con el uso de un tornillo micrométrico mostrado en la Imagen 12ma imagen, para lo cual se enfrentó un equipo con respecto al otro y se comprime el vástago del LDT y tomar lecturas de ambos equipos; este procedimiento se repitió tres veces y se ajustó la lectura de los LDT con respecto a la lectura del tornillo micrométrico; hasta obtener los resultados indicados en la Tabla 16.

Tabla 16. Ajuste de equipo LDT con respecto al tornillo micrométrico. Fuente: El autor

Medición tornillo micrométrico (mm)	Lectura LDT (mm)	Error (mm)
0	0	0
1,000	1,000	0
1,500	1,501	0,001
2,000	2,000	0
3,000	3,000	0
5,000	5,002	0,002
7,000	7,002	7,002
9,000	9,001	0,001
10,000	10,001	0,001
15,000	15,001	0,001
20,000	20,001	0,001
25,000	25,001	0,001
30,000	30,001	0,001

De la misma manera; para hallar el módulo de rotura del concreto se empleó un marco a flexión de una capacidad de 100 kN (10 t), (ver Imagen 13) especialmente diseñado para esta finalidad el cual cumple con los requisitos de la norma ASTM-C-1609 y permite la adquisición de los datos de deformación con los transductores de desplazamiento LDT; dicho equipo se calibró el 2014-11-15 con el código de informe 1519 por la empresa Concrelab acreditada en la variable fuerza por el ONAC.



Imagen 13. Prensa para concreto marca Controls modelo MC 8, con marcos a flexión y compresión. Fuente: El autor.

Una vez puesto a punto el equipo, se realizaron pruebas piloto con la finalidad de observar otras variables que no se han tenido en cuenta hasta el momento de la prueba; empleando vigas de las mismas dimensiones escogidas anteriormente.

Sin embargo dichas vigas tenían una edad de 28 días y el contenido de fibras era incierto; solo se empleó con la finalidad de realizar pruebas y comprobar la precisión de los equipos, adicionalmente corroborar el adecuado diseño de los implementos dichos anteriormente, esto se muestra Imagen 14.



Imagen 14. Imágenes de prueba piloto sobre viga SFRC de contenido incierto, nótese el equipo de sujeción ya fabricado. Fuente: El Autor.

De acuerdo a éste ensayo se perfeccionaron los formatos diseñados para éste trabajo; ver Tabla 17, igualmente se obtiene unas velocidades de onda, las cuales están dentro del rango dado por el equipo Pund It para concretos (PROCEQ SA, 2013) y la adquisición de datos funcionó hasta 58 μm , lo cual es lógico y admisible. La tabla completa se puede observar en Apéndice 3.

Tabla 17. Resultados obtenidos en prueba piloto al Concreto SFRC. Fuente: El autor.

PUNTO MEDIDO (Indicación de la carga kN)	UPV (μs)	VELOCIDAD (m/s)	INDICACIÓN DEFORMACIÓN (1)	INDICACIÓN DEFORMACIÓN (2)
0	187,3	3256,8073	0	0
1,5	186	3279,5699	3,5	4,4
2	187,4	3255,0694	7	5,6
2,5	187,8	3248,1363	6,1	7,3
3	187,9	3246,4077	8,8	8,9
3,5	188,4	3237,7919	12,3	10,1
4	189,6	3217,2996	13,2	10,1
4,5	190,6	3200,4197	15,4	11,3
5	192,8	3163,9004	18,4	13,3
5,5	191,4	3187,0428	20,2	14,9
6	190,1	3208,8375	23,2	16,5
6,5	190,1	3208,8375	25,9	18,6
7	197,1	3094,8757	28,9	20,6
7,5	192,4	3170,4782	32,4	25,4
8	190,6	3200,4197	38,6	27,4
8,5	193,3	3155,7166	43,9	30,2
9	192,9	3152,2602	46,5	31,9
9,5	191,6	3183,7161	49,1	33,1
10	193,1	3168,986	53,5	35,9
10,5	193,9	3145,9515	58,3	41,9
11	293	2081,9113	200	200

Adicionalmente se observó la necesidad de aplicar una velocidad baja de carga, porque si se emplea la velocidad promedio recomendada por la norma ASTM-C-1609, no se alcanza a registrar la velocidad de pulso ultrasónico, comparándola con el esfuerzo que se está midiendo en ese instante, debido a que el equipo de registro de velocidad de pulso ultrasónico se controla manualmente y no tiene opción para controlarse con la

prensa de ensayos. Esto permitió adecuar los equipos para la ejecución de los ensayos mecánicos oficiales.

5.3.3 Ejecución de ensayos.

Una vez ejecutado lo anteriormente expuesto se procedió a la ejecución de los ensayos propuestos en el trabajo de grado en el siguiente orden:



Gráfica 14. Orden de ejecución de ensayos. Fuente: El autor.

De acuerdo con esto, se dio inicio con la determinación del peso y la toma de las medidas de los elementos a ensayar, simultáneamente se verificó el funcionamiento de los equipos a emplear, luego de esto se ejecutaron los ensayos mecánicos a los elementos, para obtención de resultados similares, estos ensayos se realizaron en un intervalo de 16 horas, con la finalidad de reducir una variación significativa en la resistencia mecánica del concreto.

A continuación se muestra y describe cada ensayo.

5.3.4 Ensayos a Flexión

Cómo se ha enfatizado anteriormente, para la ejecución de los ensayos a flexión se siguieron los requerimientos de la norma ASTM – C- 1609, la cual establece los requisitos para realizar los ensayos de los módulos de ruptura en vigas fibroreforzadas con aplicación de la carga a tercio medio de la luz, se utilizó una velocidad muy baja para la ejecución de los ensayos, con la finalidad de registrar las velocidades de onda ultrasónica.

La adquisición de los datos de la velocidad de pulso ultrasónico, se realizó utilizando el software Punditlink versión 2.4; el cual fue adquirido con el equipo Pund It de la Universidad Nacional de Colombia.

Dicho software permite registrar los datos del tiempo que tarda la onda sonora en desplazarse del generador al transductor, adicionalmente con la distancia entre estos elementos, se determina la velocidad de onda medida en el concreto para cada uno de los elementos a ensayar.



Imagen 15. Registro fotográfico de la ejecución de ensayos a flexión del concreto. Fuente: El Autor.

Igualmente con los elementos anteriormente descritos, se midió la deflexión del elemento y registrar los datos, mediante el software Controls MC8 versión 5.0, dichos datos se lleva a un formato xls y se organizaron empleando el programa Microsoft Excel versión 2010. En la Imagen 15 se muestra en una secuencia de imágenes, la ejecución de los ensayos. Los resultados de estos ensayos se exponen a continuación. Se pueden observar los resultados con mayor detalle en los apéndices de éste trabajo.

RESULTADOS PARA LA MEZCLA DE CONCRETO SFRC 0 kg/m³.

En una ejecución de los ensayos en la mezcla de concreto sin refuerzo con fibras de acero, se dejó instalada la instrumentación completa del ensayo hasta el colapso del elemento y se notó un alto peligro de daño en los transductores LDT, debido a que las vigas sin refuerzo presentan colapsos instantáneos y explosivos afectando los equipos. Esto conlleva a que en los siguientes ensayos de este tipo de mezcla, estos se realizaran hasta el 70% de la carga observada en el primer ensayo con la instrumentación completa y se retiraron los instrumentos de medición de la deflexión y palpadores del Pund It antes de la falla. A continuación se exponen los resultados compilados. (En el apéndice de éste trabajo se exponen al detalle los resultados obtenidos para cada elemento). En la Tabla 18 se muestran un resumen de la compilación de los resultados obtenidos; los datos completos se encuentran en los anexos de éste trabajo. En la Imagen 16 se muestra el resumen fotográfico de los ensayos ejecutados

Tabla 18. Parte uno del compilado de resultados de medición UPV para concreto con SFRC 0 kg/m³. Fuente el autor

PUNTO MEDIDO (Indicación de la carga kN)	UPV (μ s)	VELOCIDAD (m/s)	INDICACIÓN DEFORMACIÓN (μ m)	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa)
0	223,9	2766,7	0,000	0,00
2	201,6	3061,0	3,267	0,26
4	201,7	3057,3	6,483	0,51
6	201,4	3063,0	9,767	0,77
8	195,6	3213,0	13,433	1,02
10	195,4	3212,0	15,900	1,28
12	195,1	3215,7	19,683	1,53
14	182,1	3437,3	22,500	1,79
16	207,2	2944,7	26,017	2,04
18	193,2	3162,0	29,617	2,30

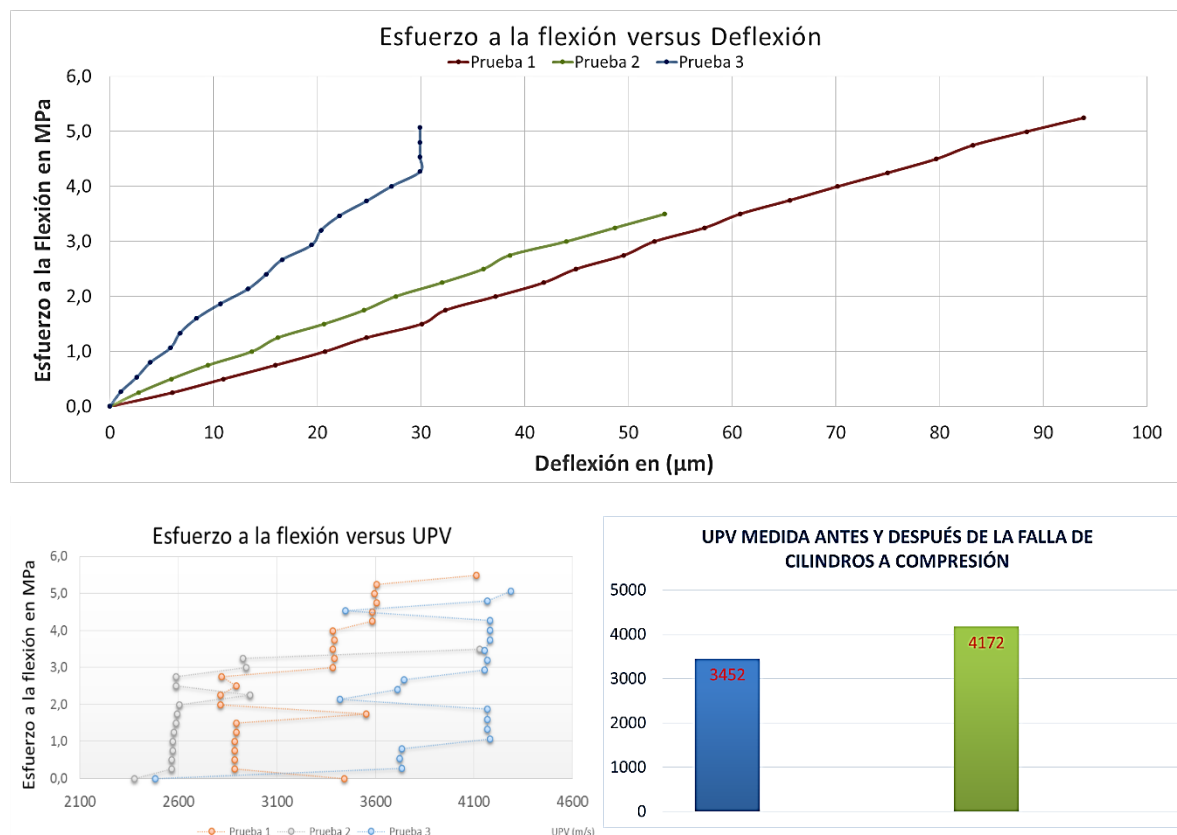
20	200,6	3074,7	32,517	2,55
22	197,1	3186,0	35,850	2,81
24	175,7	3497,3	38,950	3,06
26	176,1	3491,0	42,733	3,32
28	156,1	3897,0	46,333	3,58
30	161,2	3787,0	46,350	3,87
32	161,4	3782,0	50,025	4,13
34	171,9	3515,5	52,450	4,39
36	156,7	3875,5	54,775	4,65
38	154,2	3945,5	56,550	4,91
40	166,9	3595,0	88,400	4,99
42	166,4	3606,0	93,900	5,24
44	145,9	4112,0	0,000	5,49

Imagen 16. Resumen fotográfico de los ensayos realizados al concreto con 0 kg/m³, Fuente el autor



Se hace aclaración que solo una viga fue instrumentada hasta la falla, el resto de vigas hasta el 70% por la justificación anteriormente dada en el capítulo 5.3.4. De acuerdo a estos datos se obtienen de la Gráfica 15.

Estos resultados se compilaran y analizaran en el capítulo de análisis de resultados de éste trabajo.



Gráfica 15. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 0 kg/m³. Fuente: El autor.

RESULTADOS CONCRETO MEZCLA SFRC 25 kg/m³.

Para los ensayos efectuados en las vigas reforzadas con 25 kg/m³ de fibras de acero, se instrumentaron hasta el colapso del elemento, dado que no se genera falla explosiva, sin embargo las fallas presentadas eran súbitas, vale la pena aclarar que las fibras permitieron sostener la fisura de falla y por lo tanto la viga no colapsa, ni rompe de manera frágil (comportamiento típico en el concreto), permitiendo que la instrumentación no sufra esfuerzos adicionales que puedan ocasionar su daño.

Al realizar los ensayos y observar el comportamiento que tenían los elementos una vez presentaran fallo, se tomó la decisión de realizar un ensayo adicional, no contemplado en la propuesta de éste trabajo, y es la medición de la resistencia del elemento una vez el concreto presentará falla; a lo cual en éste trabajo se le colocó el nombre de resistencia

pos-falla y se realizó con la finalidad de observar la resistencia de la adhesión entre las fibras de acero y el concreto, obteniendo resultados interesantes. A continuación se describen los ensayos de éstos elementos; igual que el anterior ensayo, los resultados completos del mismo se adjuntarán en la parte de apéndice de éste trabajo.

Tabla 19. Resultados compilados obtenidos para las mezclas SFRC 25 kg/m³. Fuente el autor.

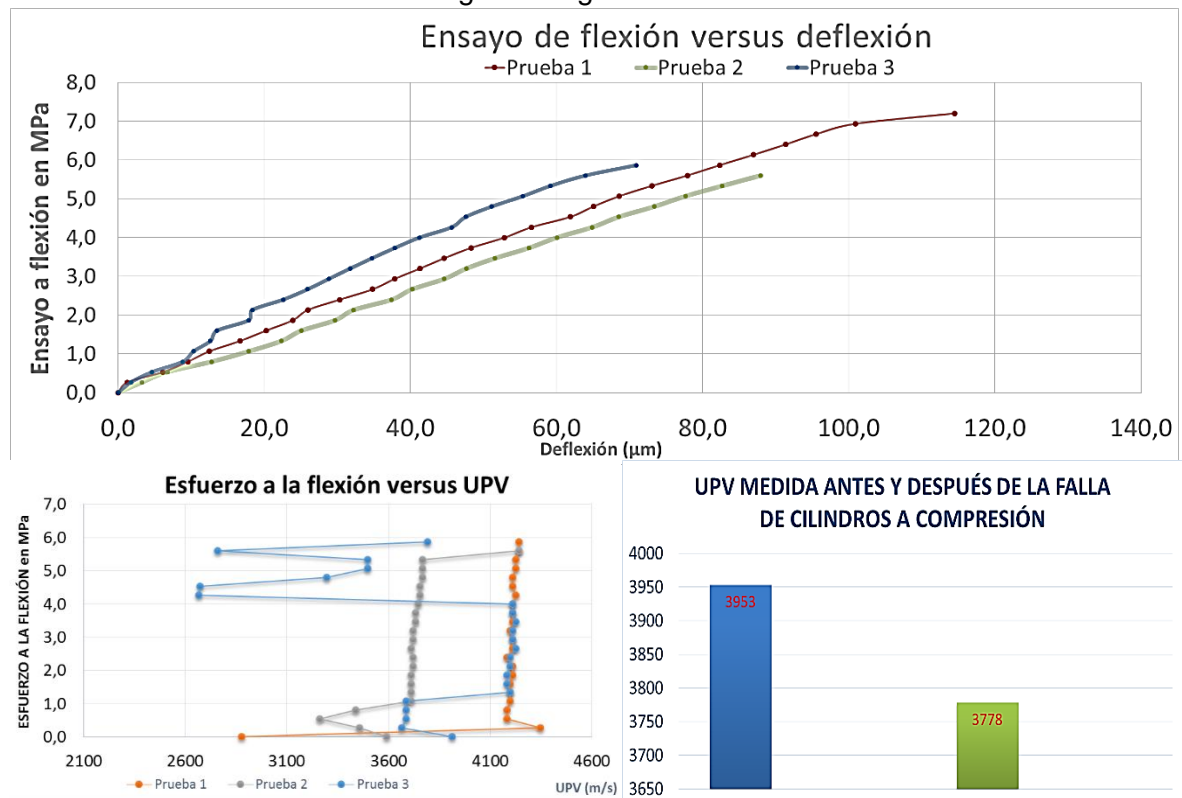
PUNTO MEDIDO (Indicación de la carga kN)	UPV (μs)	VELOCIDAD (m/s)	INDICACIÓN DEFORMACIÓN (μm)	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa)
0	178,73	3459,00	0,00000	0,000
2	160,57	3822,67	2,08333	0,267
4	165,57	3710,33	5,85000	0,533
6	162,40	3768,67	10,40000	0,800
8	157,90	3864,33	13,58333	1,067
10	151,23	4034,00	17,23333	1,333
12	151,40	4029,33	19,63333	1,600
14	151,07	4034,33	23,81667	1,867
16	150,90	4042,67	25,55000	2,133
18	151,07	4033,00	30,13333	2,400
20	150,73	4048,67	33,68333	2,667
22	150,57	4047,67	37,11667	2,933
24	150,57	4042,67	40,23333	3,200
26	150,40	4056,00	43,66667	3,467
28	150,23	4051,33	47,48333	3,733
30	178,07	4055,33	51,40000	4,000
32	177,57	3549,33	55,71667	4,267
34	163,40	3546,67	59,35000	4,533
36	159,90	3758,33	63,20000	4,800
38	169,23	3829,33	67,21667	5,067
40	149,23	3829,33	71,65000	5,333
42	148,73	3746,33	76,61667	5,600
44	151,90	4015,50	76,65000	5,867
46	143,40	4240,00	86,95000	6,133

48	142,90	4255,00	91,35000	6,400
50	142,40	4270,00	95,55000	6,667
52	141,90	4285,00	100,90000	6,933
54	160,90	3779,00	114,50000	7,200

Imagen 17. Resumen fotográfico de los ensayos de las mezclas SFRC 25 kg/m³. Fuente: El autor.



Con estos datos se obtienen las siguientes gráficas:



Gráfica 16. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 25 kg/m³. Fuente: El autor.

Los resultados obtenidos demuestran un mejor comportamiento del concreto, el cual ya tiene un comportamiento dúctil, sin embargo su rango elástico predomina al plástico, pero esto demuestra que las fibras de acero ocasionan un comportamiento dúctil del concreto. Igualmente el concreto una vez presenta fisuramiento, resistirá hasta 0,55 MPa; gracias a las fibras que no permite un colapso del elemento. Estos ensayos se analizarán en el capítulo de análisis de resultados.

RESULTADOS CONCRETO MEZCLA SFRC 70 kg/m³.

Para los ensayos realizados a elementos reforzados con SFRC de 70 kg/m³, al igual que el anterior, se mantuvieron los instrumentos de medición hasta la falla de la viga, de la misma manera se realizó la prueba de carga después de la falla del elemento (pos-falla) para observar el comportamiento del concreto una vez el elemento se encuentre con alto agrietamiento. La gran cantidad de fibras ocasionó que éste tuviera un comportamiento totalmente dúctil y no se presentó falla explosiva ni súbita, permitiendo observar el instante en el que la viga de concreto presentó su primera fisura y el cómo se iba agravando a medida que la deflexión del elemento aumentaba; Tabla 20 se exponen los resultados.

Tabla 20. Parte uno del compilado de resultados de medición UPV para Concreto con SFRC 70 kg/m³. Fuente el autor.

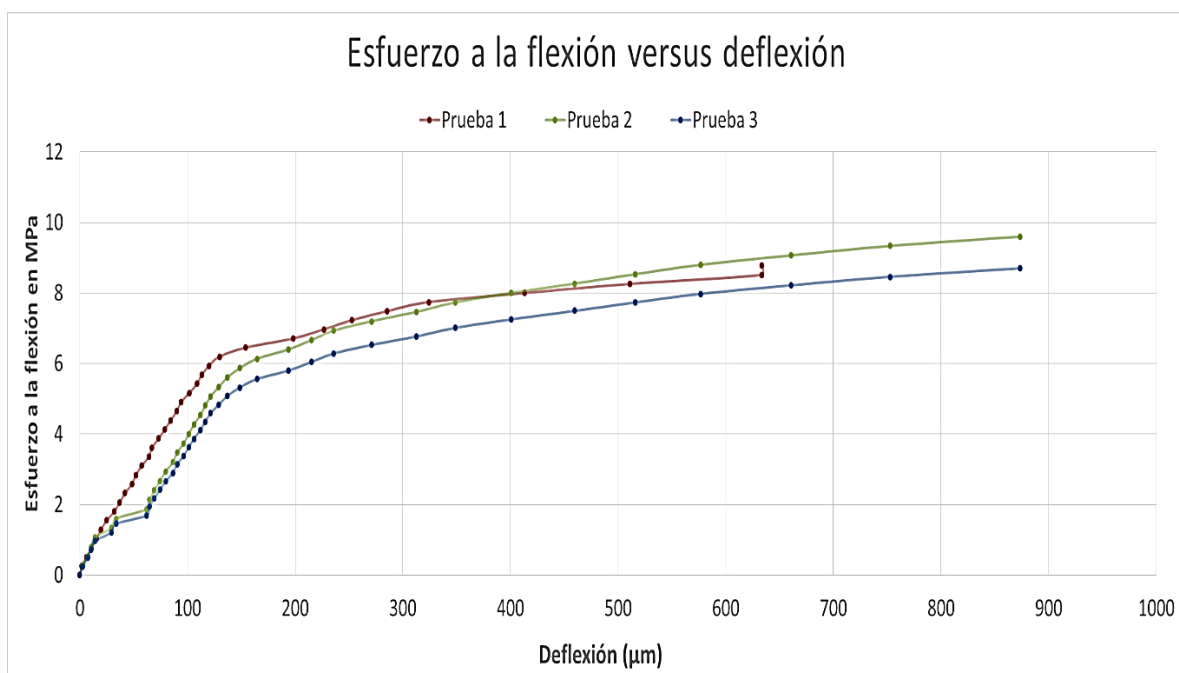
PUNTO MEDIDO (Indicación de la carga kN)	UPV (μs)	VELOCIDAD (m/s)	INDICACIÓN DEFORMACIÓN (μm)	ESFUERZO A LA FLEXIÓN (MPa)
0	168,65	3586,67	0,00000	0,000
2	194,65	3141,00	2,30000	0,255
4	177,28	3439,67	6,86667	0,511
6	173,78	3526,00	10,43333	0,766
8	177,40	3501,00	14,33333	1,022
10	176,90	3501,00	25,96667	1,277
12	176,53	3504,33	30,68333	1,533
14	176,53	3504,33	52,01667	1,788

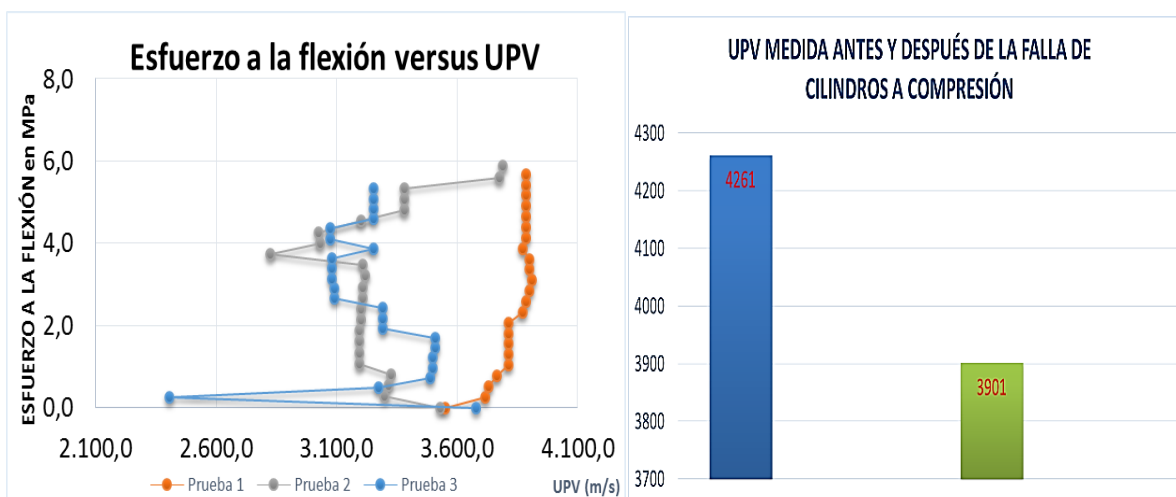
16	179,15	3434,67	55,38333	2,044
18	178,90	3455,00	60,23333	2,299
20	178,53	3462,00	65,70000	2,555
22	186,90	3399,67	70,43333	2,810
24	187,15	3406,67	76,71667	3,066
26	181,53	3397,00	81,58333	3,321
28	176,65	3268,67	86,56667	3,577
30	174,03	3329,00	91,96667	3,832
32	177,03	3388,33	96,91667	4,088
34	176,90	3387,67	102,55000	4,343
36	173,90	3447,67	107,55000	4,598
38	174,15	3507,67	112,76667	4,854
40	174,15	3507,67	120,00000	5,109
42	164,90	3639,00	127,51667	5,365
44	167,53	3643,00	136,85000	5,620
46	164,65	3580,33	149,71667	5,876
48	167,65	3638,67	172,33333	6,131
50	164,28	3581,67	196,11667	6,387
52	161,15	3641,67	223,28333	6,642
54	163,90	3646,00	270,85000	6,863
56	163,57	3652,00	312,70000	7,117
58	163,57	3652,00	348,65000	7,371
60	163,40	3652,00	400,55000	7,625
62	163,40	3657,00	459,70000	7,879
64	157,07	3869,50	516,00000	8,134
66	158,40	3788,00	576,90000	8,800
68	158,40	3788,00	660,70000	9,067
70	157,90	3800,00	752,55000	9,333
72	157,40	3812,00	873,35000	9,600

Imagen 18. Resumen fotográfico de los ensayos a las mezclas SFRC 70 kg/m³. Fuente: El autor.



Al observar los datos obtenidos, es notable que el concreto tuvo una alta deformación, esto se demuestra en la Gráfica 17, al obtener un amplio rango plástico del material, ocasionando un comportamiento en estas mezclas dúctil y por lo tanto el concreto permitió una deformación más amplia con respecto a las demás mezclas. Esto se explicará a mayor detalle en el capítulo de análisis de resultados.





Gráfica 17. Gráficas obtenidas en los ensayos ejecutados sobre las vigas con SFRC 70 kg/m³. Fuente: El autor.

5.3.5 Ensayos A Tensión

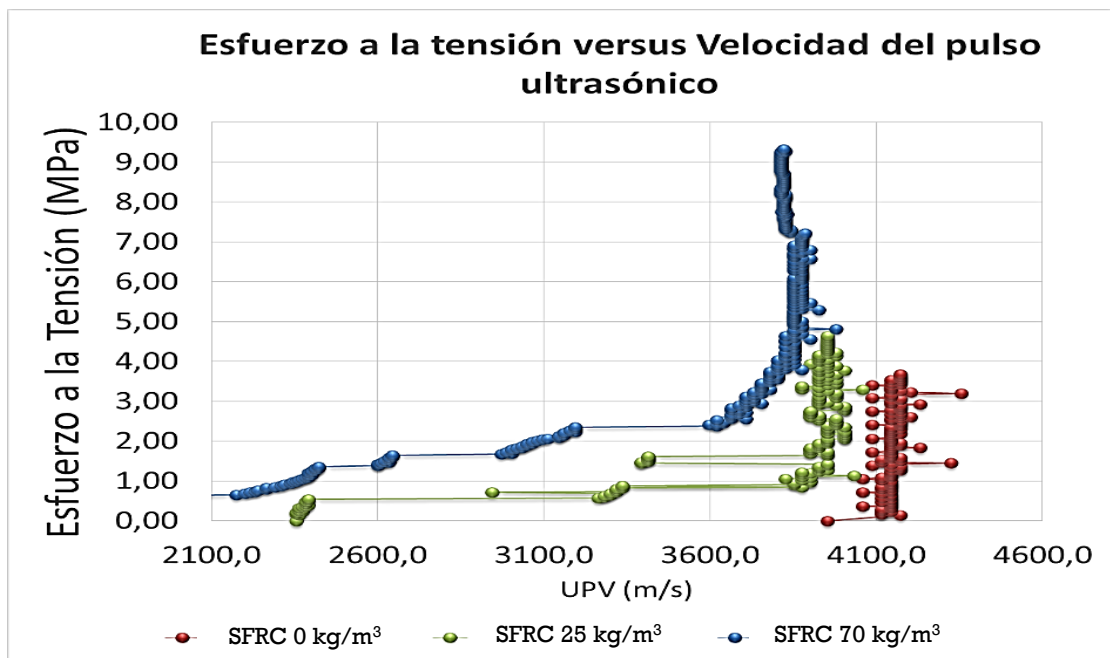
Para la realización de estos ensayos, se siguieron los criterios de la norma NTC 722 “Determinación de la tensión indirecta del concreto”; para éste ensayo hubo una variación con respecto a los ensayos de flexión y es que no se instrumentó el cilindro para medir la deformación a tensión del concreto, debido a que los transductores de deformación tipo LDT, no fue posible colocarlos dentro del marco a compresión de la máquina, debido a que no caben dentro del espacio disponible en dicho marco.

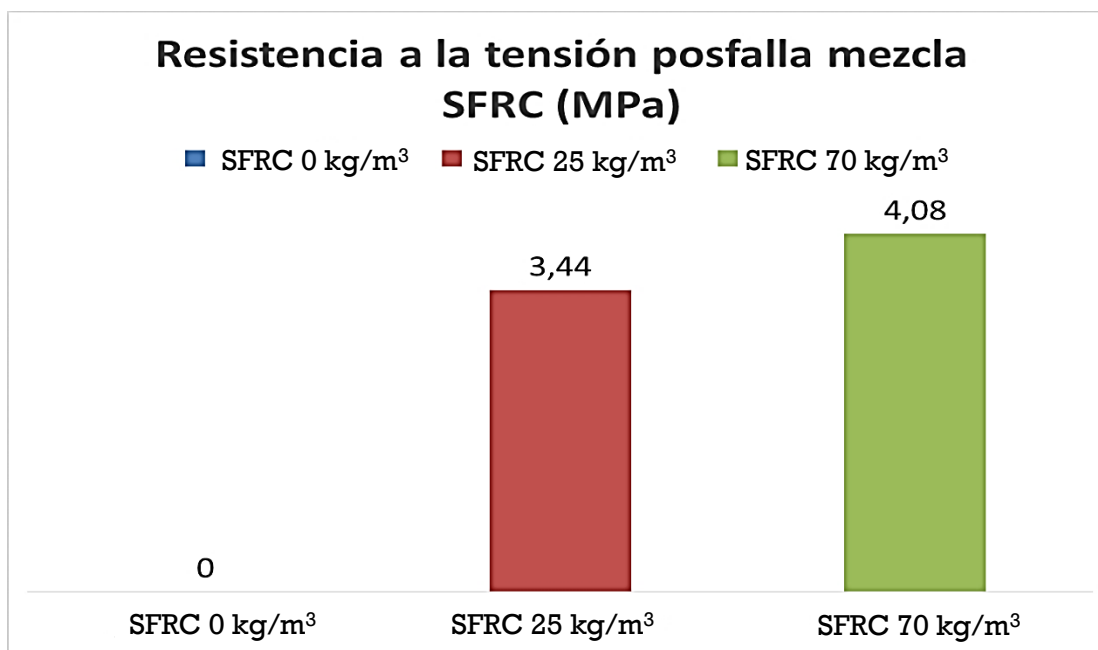
Igualmente en éste ensayo determinar la deformación no es muy útil; debido a que no se está midiendo el estiramiento del cilindro, por lo cual no se encontraría ningún parámetro útil para el proyecto.

Sin embargo, se midió la velocidad de pulso ultrasónico con el equipo diseñado para sostener los palpadores y se comparó éste valor con la resistencia a tensión, en los anexos de éste trabajo se encontrará la tabla con los resultados obtenidos; en la Gráfica 18 se muestra las gráficas de los resultados obtenidos y en la Imagen 19 el resumen fotográfico.



Imagen 19. Resumen fotográfico de los ensayos realizados a tensión indirecta. Fuente el autor.





Gráfica 18. Gráficos obtenidos de los ensayos de tensión indirecta. Fuente Al autor.




De éste ensayo se destacan el comportamiento que tuvo el registro de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la resistencia a la tensión del concreto; a su vez se observó que el cilindro que tenía mayor cantidad de fibras de acero; presentó fisuramiento pero fue imposible separar la fisura, incluso al ejercer más fuerza con la máquina a compresión, el cilindro se aplastó y no separó en dos mitades, comportamiento que en una estructura se tomaría como una segunda oportunidad del elemento, sin que éste presentase fallas explosivas ni súbitas.

5.3.6 Ensayos a compresión simple

Igualmente es necesario verificar la resistencia a la compresión del concreto, aplicando carga axial a unos cilindros de concreto, esto se realizó bajo los criterios de la NTC 673 “Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto”. De la misma manera se midió la velocidad de pulso ultrasónico antes y después de realizar las

pruebas de resistencia a la compresión de las diferentes mezclas evaluadas en éste trabajo; en la Tabla 21, se muestran los resultados de los ensayos realizados.

Tabla 21. Tabla de resultados de ensayo a compresión para mezcla SFRC 0, 25 y 70 kg/m³. Fuente: El Autor.

TIPO DE MEZCLA SFRC (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)	Tipo de falla	UPV antes de la falla (m/s)	UPV después de la falla (m/s)	Fotografía
0	57	Columnar	3452	4172	
25	53	Transversal	3952	3778	
70	44	Transversal	4261	3901	

Los resultados de la resistencia a la compresión del concreto, fueron muy similares en las tres mezclas, sin embargo a mayor contenido de fibras se disminuyó la resistencia a la compresión, éste valor fue del 7% para el contenido de 25 kg/m³ y 23% para el contenido de fibras de 70 kg/m³ con respecto a la resistencia a la compresión del concreto sin fibras de acero.

Autores como (Jianming, Sun, & Morino, 1997); (Mármol Salazar, 2010) establecían que las fibras de acero disminuían la falla explosiva y súbita en el concreto sometido a

compresión, sin embargo la resistencia del concreto se afecta en baja proporción, por lo cual entre más contenido de fibras disminuye la resistencia, éste comportamiento se debe a que las fibras de acero no tienen una alta capacidad de soporte ante esfuerzos de compresión, afectando al concreto (Mármol Salazar, 2010).

Es notable que al momento de la falla de los cilindros con alguna mezcla SFRC, no explotaban ni fallaban súbitamente; sencillamente se fisuraban de manera columnar y transversal sin presentar pérdidas de material; debido a que las fibras cosen las fisuras y no permitían el desprendimiento de elementos en la probetas, de la misma manera los cilindros se deformaban ampliamente. Esto se analizará al detalle en el capítulo de análisis de resultados.

Por todo lo anterior se destaca que la resistencia a la compresión del concreto estuvo por encima de la resistencia especificada, cumpliendo con éste importante parámetro. En el capítulo de análisis de resultados se entrará en detalle de la importancia en los resultados obtenidos en éste trabajo y se destacará hallazgos significativos encontrados en el desarrollo del mismo.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Por todo lo anteriormente descrito, se puede establecer que el concreto reforzado con fibras de acero tiene un comportamiento elástico-plástico generando un comportamiento dúctil en el concreto, para lo cual se analiza los resultados obtenidos a continuación.

6.1 Comportamiento mecánico

Recordando, se realizaron tres tipos de mezclas de concreto reforzadas con diferentes cantidades de fibras de acero, una con 0 kg/m^3 , otra con 25 kg/m^3 y otra con 70 kg/m^3 , a las cuales se les midió parámetros tales como la resistencia a la flexión del elemento (módulo de ruptura), deformación y medición de la velocidad del pulso ultrasónico a medida que el elemento presenta daño y alta deformación; estos resultados se muestran a continuación.

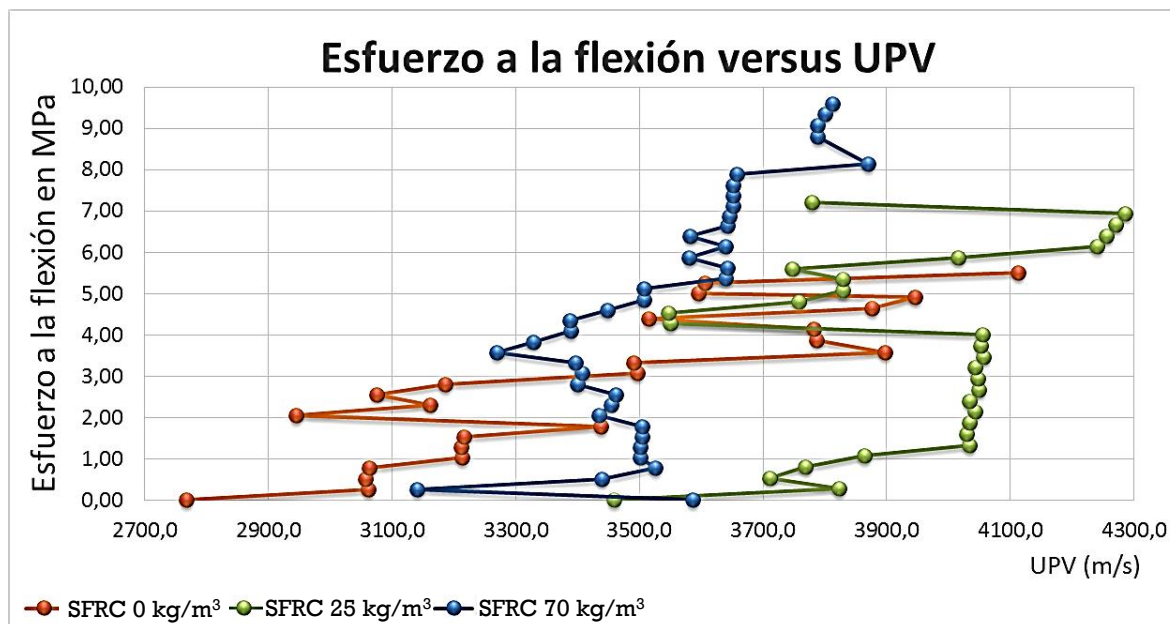


Imagen 20. Resumen gráfico de las actividades realizadas a la mezcla SFRC. Fuente: El Autor

Como se observa en la Imagen 20, las fibras de acero cosen las fisuras del elemento; permitiendo que al momento de la primera fisura; el elemento no falle de manera súbita,

concediendo un comportamiento plástico. Inclusive en la mezcla de concreto con la mayor cantidad de fibras, presentó un comportamiento dúctil.

Por lo tanto una de las ventajas de las fibras de acero es impedir que el concreto falle de manera súbita y frágil, evitando la fractura total del elemento; adicionalmente permite que el mismo tenga una buena deflexión antes de fallar.



Gráfica 19. Gráfico resumen y comparativo de los resultados obtenidos para las tres mezclas SFRC del concreto. Fuente: El autor.

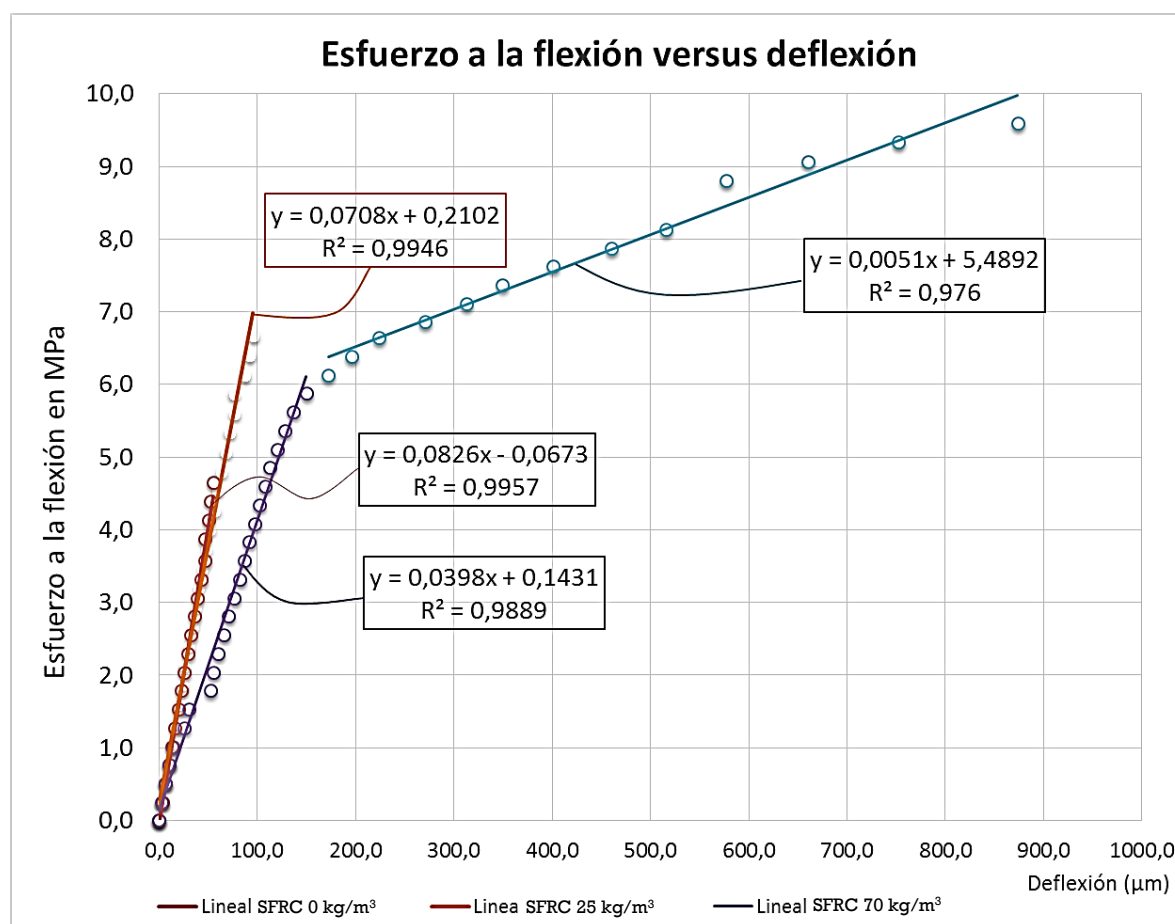
Por lo anterior se establece que el concreto con mayor cantidad de fibras de acero, tuvo un comportamiento dúctil, mientras que la mezcla SFRC de 25 kg/m³ tuvo un comportamiento elástico-plástico y se incrementó su resistencia a la flexión con respecto al concreto simple, sin embargo el rango plástico del elemento es muy pequeño, siendo mejor una parte de la fluencia del elemento.

Esto demuestra que las fibras de acero aumentan la resistencia a la flexión del concreto (resultado esperado por las conclusiones analizadas de las referencias bibliográficas de éste trabajo).

Con la finalidad de entender mejor los resultados y poder determinar la tenacidad del elemento; se decide aplicar las recomendaciones dadas por la norma ASTM-C-1018 (Método de ensayo para determinar la tenacidad flexional y primera fisura del concreto reforzado con fibras, aplicando cargas en el tercio medio de la luz en vigas) en la cual se

especifica que la tenacidad es el resultado de obtener el área bajo la curva del diagrama esfuerzo a la flexión versus la deflexión de una viga en concreto SFRC cargada en los tercios medio de la luz; tal cual cómo fueron elaborados las pruebas mecánicas anteriormente descritas. (ASTM (American Standard Testing and materials), 1997)

Para lo cual se definen dos rangos en los elementos evaluados; uno elástico y otro plástico; a cada rango se le determinó una tendencia lineal y se estableció la ecuación del mismo. Con lo anterior se obtiene la Gráfica 20. Esta gráfica se retomará en el capítulo de tenacidad.



Gráfica 20. Diagrama esfuerzo vs deflexión de las mezclas SFRC interpoladas de manera lineal. Fuente el Autor.

De ésta gráfica se destaca el comportamiento diferente de cada una de las mezclas y la variación de las pendientes en cada una de las ecuaciones, las cuales se interpretan como la rigidez que tiene cada elemento; esto se resume de la siguiente manera; para la mezcla en concreto simple la pendiente en su rango elástico es de 0,0826 MPa/μm, para

la mezcla SFRC 25 kg/m³ fue de 0,0708 MPa/μm y para la mezcla de SFRC 70 kg/m³ fue de 0,0398 MPa/μm, por lo tanto la variación en las pendientes es de 14% para la mezcla SFRC 25 kg/m³ y 52% para la mezcla 70 kg/m³ con respecto al concreto simple, lo que marca la disminución de la rigidez de los elementos a medida que se incrementa el contenido de fibras.

Lo anterior justifica el por qué se disminuye la resistencia a la compresión; al ser el concreto menos rígido con el aumento de las fibras de acero (Almansa Moreno & Cánovas Manuel, 1997). Recordando las reducciones en la resistencia a la compresión presentadas fueron del 7% para el contenido de 25 kg/m³ y 23% para el contenido de fibras de 70 kg/m³.

Igualmente las fibras de acero aumentaron la resistencia a la flexión del concreto, obteniendo los siguiente valores para los 9 ensayos realizados; para las mezclas SFRC 25 kg/m³ en promedio fue de 7,20 MPa, para las mezclas de SFRC 70 kg/m³ fue de 5,876 MPa el punto máximo del rango elástico del material (primera fisura del material); sin embargo el concreto de dicha mezcla tuvo un máximo esfuerzo a flexión de 9,60 MPa antes del colapso. Si se comparan estos resultados con la resistencia a la flexión de la mezcla 0 kg/m³ (la cual fue de 5,49 MPa), se obtuvo un aumento de 31% para la mezcla de 25 kg/m³, 7% en la primera fisura y 75% en la máxima carga soportada con la mezcla de 70 kg/m³.

Es de aclarar, que una cantidad de 70 kg/m³ de fibras de acero es muy alta, esto se puede evidenciar en Imagen 20, lo que haría que la mezcla sea difícil de trabajarla y tenga un alto costo de fabricación.

De la misma manera los resultados de tensión tienen comportamientos similares; estos resultados fueron los siguientes: SFRC 0 kg/m³ 3,68 MPa; SFRC 25 kg/m³ 4,64 MPa y SFRC 70 kg/m³ 9,3 MPa; igualmente que en los módulos de ruptura, el refuerzo con fibras de acero aumentó la resistencia a la tensión en un 26% para la mezcla SFRC 25 kg/m³ y 153% en la mezcla SFRC 70 kg/m³, resultado esperado, debido a que las fibras de acero su mejor comportamiento mecánico es ante este tipo de esfuerzos.

Inclusive en las mezclas con mayor contenido de fibras, las probetas ensayadas tuvieron una mayor deformación con respecto a las otras, sin embargo no fue posible ocasionar una ruptura total del elemento, el concreto de dicha mezcla se aplastó hasta el punto que

la máquina de ensayos no pudo continuar por su límite de carrera y estas no colapsaron en su totalidad, en cambio para las demás muestras si se pudo romper el concreto después que estas presentaran fisuras. Para observar lo establecido anteriormente ver la Imagen 21.



Imagen 21. Imágenes de los ensayos realizados a tensión indirecta a los diferentes tipos de mezcla. Fuente el Autor

En la Tabla 22 se resumen los datos establecidos anteriormente y se comparan con los resultados esperados (explicados en el numeral 5.2.1).

Tabla 22. Resumen de resultados promedios obtenidos en la tesis de grado. Fuente. El autor.

TIPO DE MEZCLA SFRC kg/m ³	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)		MÓDULO DE ROTURA (MPa)		RESISTENCIA A LA TENSIÓN (MPa)		ECUACIÓN DEL GRÁFICO
	Obtenida	Esperada	Obtenida	Esperada	Obtenida	Esperada	
0	57	28	5,49	4,23	3,68	4,23	$y = 0,0826x$ $- 0,0673$ $R^2 = 0,9957$
25	53	28	7,20	11,06	4,64	10,16	$y = 0,0708x$

							+ 0,2102
							$R^2 = 0,9946$
							$y = 0,0398x$
70							+ 0,1431
(Rango	44	28	5,876	23,50	9,3	18,38	$R^2 = 0,9889$
elástico)							
70							$y = 0,0051x$
(Rango	44	28	9,60	23,50	9,3	18,38	+ 5,4892
plástico)							$R^2 = 0,976$

Es de notar que todas las mezclas cumplieron con los parámetros exigidos por la norma Colombiana sismo resistente 10; para todos los esfuerzos mecánicos a los que fueron sometidos los elementos (recordando la NSR 10 no hace aclaración ni distinción en las resistencias requeridas para mezclas reforzadas con fibras, sus requisitos son para el concreto simple y con éste se compara) obteniendo un 50% más de la resistencia a la compresión requerida por la norma. Igualmente al comparar con la resistencia a flexión requerida, la mezcla SFRC 0 kg/m³ obtuvo un 23% más de lo requerido y si se compara este resultado con lo obtenido para las mezclas SFRC 25 kg/m³ y SFRC 70 kg/m³ la resistencia excede en 41% y 56% más respectivamente a lo exigido.

Sin embargo la resistencia a la tensión del concreto sin reforzar con fibras de acero, no alcanzó el resultado esperado, pero al reforzarse con las fibras de acero en cualquiera de las proporciones usadas, se supera el valor recomendado por la norma; inclusive con la mezcla SFRC 25 kg/m³ supera el valor exigido, por lo cual se recomienda que al emplear fibras de acero para reforzar el concreto, no se utilice menos de 25 kg/m³, este valor es también recomendado por el comité ACI 544,4.

Igualmente, en la Tabla 22, se muestran unos valores obtenidos de ecuaciones para predecir la resistencia a la flexión y tensión recomendadas por (Song & Hwang, 2004) con la finalidad de predecir un resultado cuantitativo al momento de realizar las mezclas de concreto reforzadas con fibras de acero. De dichas ecuaciones se destacan que la resistencia a la flexión del concreto aumenta a medida que se aumentan las fibras de acero, sin embargo estas ecuaciones son bastante optimistas debido a que predecían una resistencia a la flexión y tensión del concreto muy similares a la resistencia a la compresión requerida del concreto, valor que no es posible obtener, debido a que las

fibras mejoran el comportamiento dúctil del concreto, sin embargo el incremento de la resistencia a la flexión del mismo no fue mayor que un 74% de la resistencia a la flexión del concreto sin fibras, pero al compararse con estas ecuaciones se esperaba un incremento de 328% de resistencia a la flexión, lo cual es un valor muy optimista y que en la teoría es aplicable. No obstante estas ecuaciones ayudan a establecer y comprobar que las fibras de acero aumentan la resistencia a la tensión y flexión del concreto.

6.1.1 Tenacidad

La tenacidad se refiere a la energía liberada por un material en el momento en el cuál el mismo se encuentra soportando una carga y deformándose. Para poder medir la tenacidad, se puede determinar como el área bajo la curva del diagrama de esfuerzo a la flexión versus deflexión (ASTM-C-1018).

Por lo tanto, al integrar las ecuaciones obtenidas en la Gráfica 20 se obtiene una ecuación que al reemplazarse por los valores extremos del esfuerzo se obtiene la tenacidad.

La ecuación obtenida en la primera gráfica para la mezcla de SFRC 0 kg/m³ es de $y = 0,0826x - 0,0673$; a continuación se integrará la ecuación con la finalidad de obtener una ecuación para el cálculo de la tenacidad.

$$y = 0,0826x - 0,0673$$

Ecuación 28

Se integra la ecuación con la finalidad de obtener una ecuación de tenacidad, la cual es la siguiente:

$$y = \int_0^{93,9} (0,0826x - 0,0673) dx \Rightarrow$$

Ecuación 29

$$y = \frac{0,0826x^2}{2} - 0,0673x + B$$

Con la finalidad de obtener el área bajo la curva, se evalúa la ecuación entre dos límites teniendo en cuenta que el módulo de ruptura en ésta mezcla es de 5,49 MPa y la

deflexión de 93,9 μm , estos parámetros están dentro del límite elástico del material, igualmente la constante establecida en la ecuación integrada no se determina debido a que la gráfica inicia en $x = 0$; obteniendo lo siguiente:

$$y = \frac{0,0826 (93,9)^2}{2} - 0,0673 (93,9)$$

$$Y = 357,831 \text{ MPa}/\mu\text{m}$$

Para la mezcla SFRC 25 kg/m^3 el resultado es el siguiente:

$$y = \int_0^{114,5} (0,0708x + 0,2102) dx \Rightarrow$$

Ecuación 30

$$y = \frac{0,0708 x^2}{2} + 0,2102 x + B$$

$$y = 464,31 \text{ MPa}/\mu\text{m}$$

Como para ésta mezcla el módulo de rotura fue de 7,2 MPa la deflexión en éste punto es de 114,5 μm , por lo tanto éste fue el punto para evaluar la ecuación.

En el caso de la mezcla SFRC 70 kg/m^3 , hay dos rangos perfectamente definidos, un rango elástico que está comprendido entre 0 MPa hasta 5,876 MPa con una deflexión de 149,72 μm y un rango plástico que esta entre 5,876 MPa y una deflexión de 149,72 μm hasta 9,86 MPa y una deflexión de 873,35 μm ; dando como resultado lo siguiente:

$$y = \int_0^{149,72} (0,0398x + 0,1431) dx \Rightarrow$$

Ecuación 31

$$y = \frac{0,0398 x^2}{2} + 0,1431 x + B$$

$$y = 446,22 \text{ MPa}/\mu\text{m}$$

Tenacidad obtenida para el rango elástico, y para el rango plástico:

$$y = \int_{149,72}^{873,35} (0,0051x + 5,4892) dx \Rightarrow$$

Ecuación 32

$$y = \frac{0,0051 x^2}{2} + 5,4892 x + B$$

$$y = 6738,98 \frac{MPa}{\mu m} - 879 MPa/\mu m$$

$$y = 5859,98 MPa/\mu m$$

Por lo tanto si se suma las dos áreas obtenidas, se obtiene la tenacidad de la mezcla SFRC 70 kg/m³ dando lo siguiente:

$$y = 446,22 MPa/\mu m + 5859,98 MPa/\mu m$$

$$y = 6306,2 MPa/\mu m$$

A continuación se organiza la información en Sistema Internacional de Unidades; esto es lo siguiente:

Tabla 23. Resumen de los datos obtenidos para medición de la tenacidad. Fuente el autor.

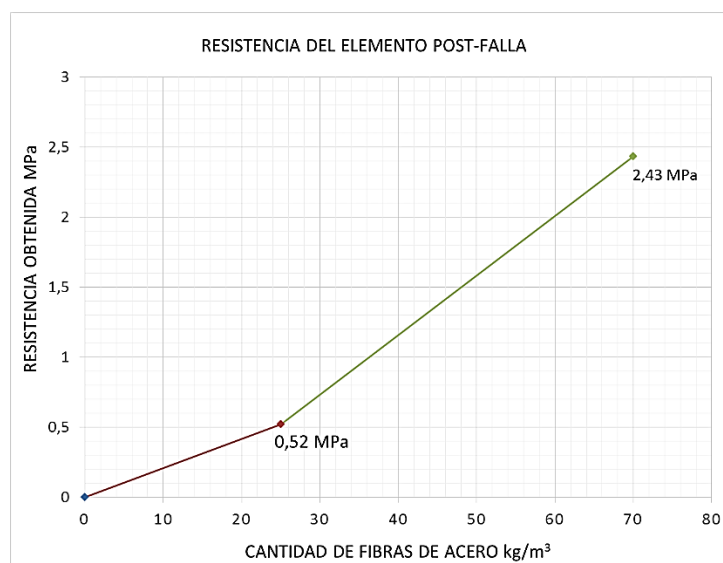
MEZCLA TIPO	RESULTADO DE LA TENACIDAD
SFRC 0 kg/m³	357,831 MPa/μm
SFRC 25 kg/m³	464,31 MPa/μm
SFRC 70 kg/m³	6306,2 MPa/μm

Por lo cual a mayor contenido de fibras, mayor es la tenacidad del material y será mejor la disipación de energía del elemento. Esto hace que se propague mejor la onda sónica en la mezcla, obteniendo valores más altos de tenacidad y por lo tanto existe mejor disipación de la energía, ocasionando que el comportamiento mecánico sea más predecible y conociendo mejor cuando existe daño de un elemento de acuerdo con la velocidad de onda. Esto comprueba que el refuerzo con fibras de acero sirve para mejorar las características del concreto y obtener un material que no tenga fallas súbitas, ni frágiles y sea más predecible en su comportamiento. Igualmente, esta liberación de energía mejorará la mezcla de concreto, sin embargo no pueden ser refuerzo primario,

debido a que la resistencia a la flexión no aumenta tanto como para pensar en reemplazo de una armadura en acero, pero si como refuerzo secundario del concreto.

6.1.2 Evaluación de la resistencia pos-falla

Un parámetro adicional que se obtuvo de éste trabajo es la evaluación mecánica del concreto reforzado con fibras, una vez se presenta la falla principal del elemento. Se realizaron pruebas cuando las vigas presentaban falla en el concreto y estos elementos fueron sostenidos por las fibras de acero; por lo tanto se obtiene un valor de cuanto carga puede soportar cada elemento; esto se muestra en la Imagen 22 y Gráfica 21.



Gráfica 21. Valores obtenidos de resistencia del elemento luego de la falla para cada mezcla SFRC.
Fuente: El autor



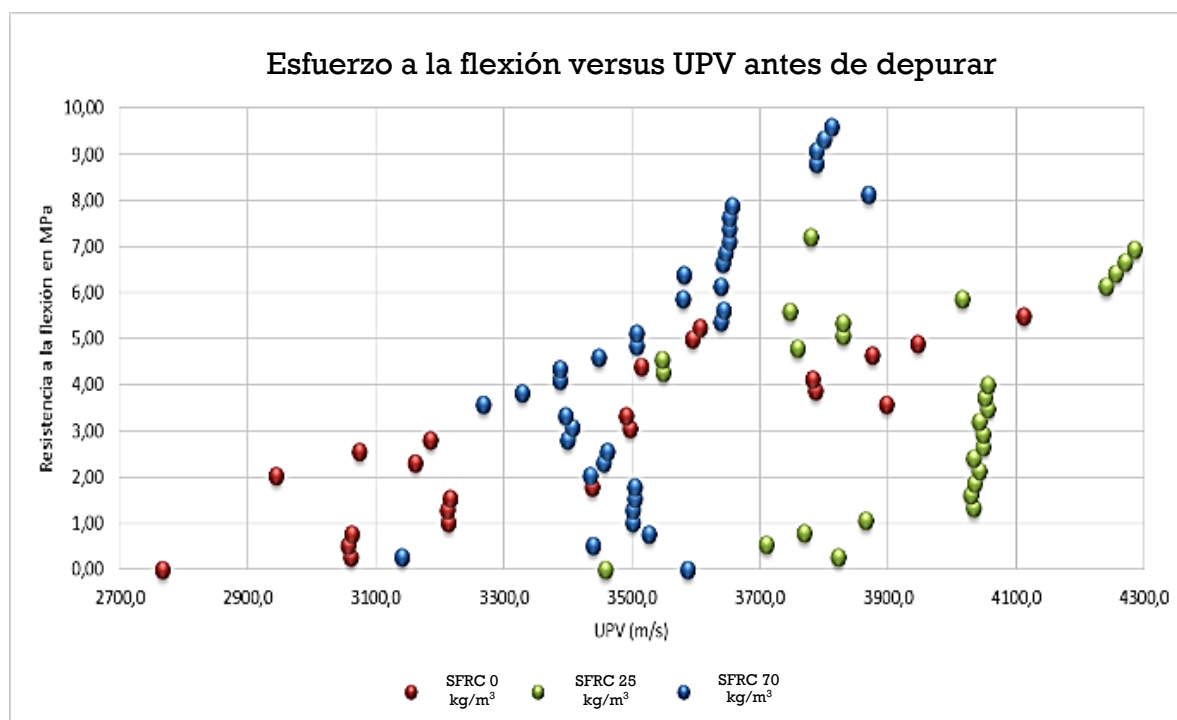
Imagen 22. Prueba de resistencia pos-falla. Fuente: El autor

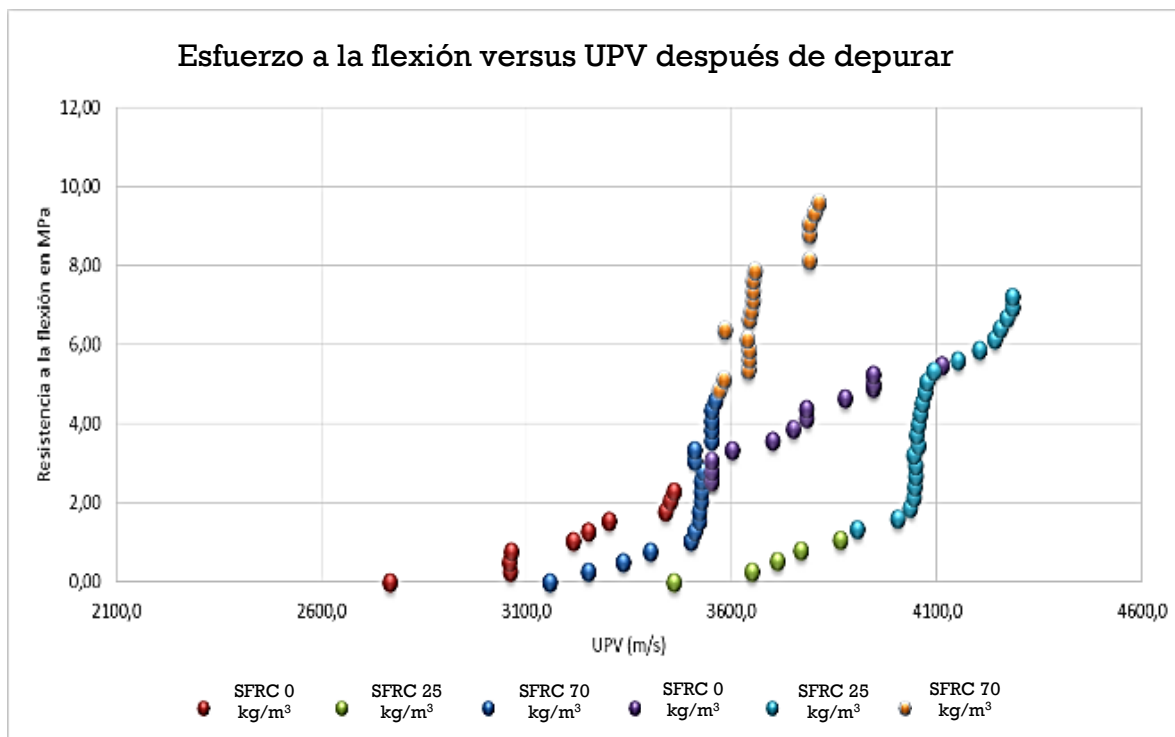
Los resultados fueron los siguientes; en la mezcla que no estaba reforzada con fibras de acero, se obtuvo una falla frágil y su resistencia fue de 0 kN pos-falla; mientras que la mezcla de SFRC 25 kg/m³ las vigas resistieron después de la falla una carga promedio de 23 kN o 2,3 t; esto ocasiona que en un sismo un elemento en concreto no colapse súbitamente. De la misma manera, con la mezcla SFRC 70 kg/m³ el comportamiento fue 4 veces mejor obteniendo una resistencia promedio de 2,43 MPa, que en términos de carga es aproximadamente 108 kN ó 10,8 t mejorando la capacidad de soporte en un elemento.

Esto demuestra que las fibras de acero tienen un comportamiento excelente, como refuerzo secundario en estructuras de concreto, lo que comprueba lo establecido por (Ding & Wolfgang, 1999) y (Guan, y otros, 2015).

6.2 Análisis de la velocidad de pulso ultrasónico en las mezclas SFRC.

De las bases teóricas consultadas, la velocidad de pulso ultrasónico depende principalmente de la densidad y la forma como se mide las ondas; para el proyecto se generaron ondas P medidas de forma directa; obteniendo resultados que se muestran en la Gráfica 22, la cual presenta los resultados antes de depurarse y después de la depuración. Para esta depuración se eliminaron los datos que no seguían la tendencia parabólica que tiene la medición de la velocidad de pulso ultrasónico.





b

Gráfica 22. Datos obtenidos de la medición de la velocidad del pulso ultra sónico, a. sin depurar. b. depurados. Fuente: El autor.

6.2.1 Correlación UPV versus esfuerzo a la flexión del elemento

Para poder correlacionar la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la resistencia a la flexión del elemento es necesario observar la tendencia de los datos, la cual en el caso de la presente investigación es lineal. Es de notar que el último dato obtenido, ocurrió cuando el elemento presentó falla y se observó que la velocidad de onda ultrasónica se incrementaba a medida que la carga aumentaba; este incremento tiende a ser constante y lineal; algo que es más evidente en las gráficas del concreto sin fibras; sin embargo la pendiente es más fuerte cuando hay refuerzo del elemento en algún porcentaje de fibras incorporadas; esto se debe a la mejor transmisión de la velocidad de onda y la mayor densidad del elemento, lo que conlleva a organizar mejor los datos y originar líneas de tendencia.

Analizando el aumento de la pendiente en las gráficas (la que tiene mayor inclinación fue en la mezcla SFRC 25 kg/m³) se presenta cuando la viga empieza a deformarse y por lo tanto comienza a fisurarse, ocasionando que la distancia recorrida se reduzca, se debe a que por encima del eje neutro la viga se comprime, disminuyendo la distancia recorrida por la onda; igualmente se presenta disminución de los poros del elemento aumentando su densidad; todo esto conlleva a que la velocidad de onda medida aumente su velocidad de propagación; esto se ilustra en Imagen 23.

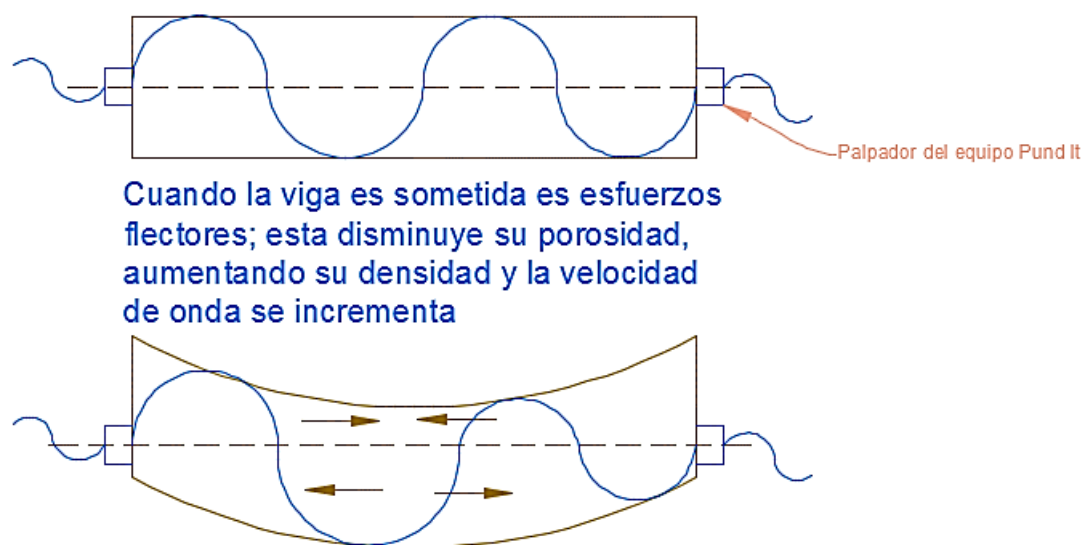
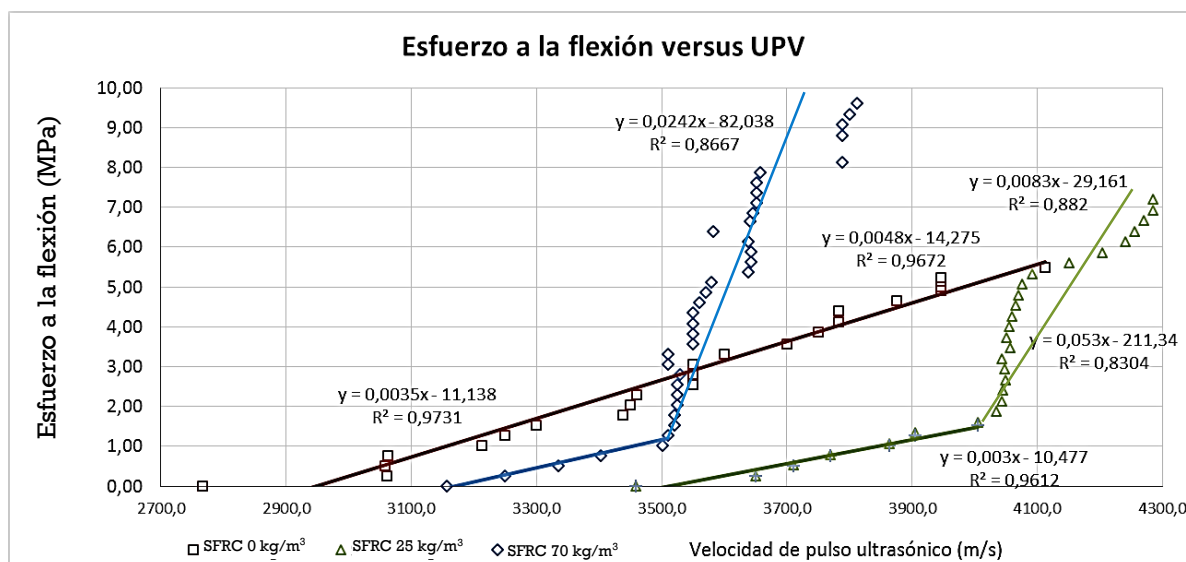


Imagen 23. Recorrido por la Onda sonora en las vigas SFRC. Fuente: El autor.

De la misma manera y para observar cuantitativamente los cambios entre pendiente de las gráficas y obtener ecuaciones, se realiza una regresión lineal de los datos.

En el concreto que estaba sin fibras de refuerzo no hay cambios en su pendiente y por lo tanto la tendencia a lo largo de los datos es la misma; en cambio para las mezclas con contenido de fibras tiene dos tipos de tendencia, una elástica y otra plástica, que en la mezcla SFRC 25 kg/m³ son dos comportamientos lineales (esto se evidencia Gráfica 20) y en la mezcla con más refuerzo hay tres tendencias debido a la mayor fluencia del material.

Por lo cual para estas mezclas se hicieron dos correlaciones y tres respectivamente. Esto se muestra en la Gráfica 23.



Gráfica 23. Líneas de tendencia de los datos. Fuente: El Autor

Hay que tener en cuenta que estas gráficas se toman del promedio de los datos obtenidos hasta la falla del elemento.

Si se observa la Gráfica 19, la mezcla SFRC que obtuvo mayor velocidad de onda fue la mezcla con un contenido de fibra de 25 kg/m³. Las mezclas de 0 kg/m³ y 70 kg/m³, tuvieron velocidades de onda cercanas con una variación de la velocidad promedio del 9% entre las dos. Igualmente la variación de las velocidades entre mezclas SFRC no son muy altas y esto se debe a que la variación de las densidades de las tres mezclas tampoco lo es; recordando la densidad de la mezcla SFRC 0 kg/m³ es de 2430,50 kg/m³, para la mezcla de SFRC 25 kg/m³ 2459,79 kg/m³ y para la mezcla SFRC 70 kg/m³ es de 2383,22 kg/m³.

Con respecto a las velocidades de onda obtenidas para la mezcla SFRC 0 kg/m³ es de 2766 m/s; para la mezcla SFRC 25 kg/m³ es de 3459 m/s y para la mezcla SFRC 70 kg/m³ es de 3141 m/s antes de la aplicación de la carga. Las mezclas que contenían fibras de acero tenían una mayor densidad y por lo tanto la velocidad de onda también. (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013).

Para la mezcla de 70 kg/m³ hubo una disminución en la densidad; debido a que mayor contenido de fibras de acero mayor es el contenido de vacíos y esto impacta la densidad (Almansa Moreno & Cánovas Manuel, 1997); a su vez disminuye la velocidad de onda obtenida; si se nota las probetas que dieron mayor velocidad de onda fueron las de 25 kg/m³, las cuales tuvieron la mayor densidad soportando las bases teóricas en las cuales se establece que a mayor densidad del elemento, mayor será la velocidad de propagación de la onda.

Igualmente las ecuaciones mostradas se determinaron con la mejor aproximación y tendencia de la gráfica. Estas pueden emplearse con la finalidad de observar si un elemento se encuentra en su límite de fallo, en la Tabla 24 se resumen estas ecuaciones:

Tabla 24. Resumen de las ecuaciones obtenidas. Fuente el autor.

MEZCLA TIPO	Ecuaciones obtenidas (el resultado da en MPa)
SFRC 0 kg/m³	$y = 0,0048x - 14,275$ $R^2 = 0,9672$
SFRC 25 kg/m³ rango elástico	$y = 0,0035x - 11,138$ $R^2 = 0,9731$
SFRC 25 kg/m³ rango plástico	$y = 0,0242x - 82,038$ $R^2 = 0,8667$
SFRC 70 kg/m³ rango elástico	$y = 0,003x - 10,477$ $R^2 = 0,9612$
SFRC 70 kg/m³ rango de fluencia	$y = 0,053x - 211,34$ $R^2 = 0,8304$
SFRC 70 kg/m³ rango plástico	$y = 0,0083x - 29,161$ $R^2 = 0,882$

Con estas ecuaciones, al reemplazar X con la velocidad de propagación de onda en el concreto, obtienen un valor del esfuerzo a la flexión actual de un elemento en MPa (variable Y).

Cuando los elementos a los cuales se les mide la velocidad de propagación de onda, son reforzados con fibras, se recomienda emplear las ecuaciones en el rango elástico; las cuáles tienen el mejor coeficiente de correlación, adicionalmente en un elemento de

concreto, si se analiza las gráficas por fuera del rango elástico se debe a que el mismo se encuentra con ligeras fisuras ocasionando que no pueda soportar mayor carga por parte del elemento. Igualmente se debe recordar que los métodos indirectos son una aproximación de las características reales de un elemento y por lo tanto son una excelente idealización de las características físicas.

Cabe anotar que la mayor pendiente obtenida en los tres gráficos es para la mezcla SFRC 25 kg/m³; la cual fue de 0,0184; tres veces más que la pendiente obtenida para la mezcla SFRC 0 kg/m³ y 0,8 más que para la mezcla SFRC 70 kg/m³. Lo que puede significar que al reforzar el concreto con fibras, se mejorará la deflexión de los elementos y soportará más carga, incrementando la velocidad de propagación de la onda; lo que establece un comportamiento dúctil de los elementos. Es por esto que la gráfica de los elementos sin fibras tuvo una tendencia totalmente lineal; al ser posible una mejor medición de la velocidad de pulso en el momento indicado de la aplicación de carga; mientras que los otros; se marcaron dos tendencias lineales, pero con diferentes pendientes marcado por el cambio de la pendiente de las gráficas.

Al observar la Gráfica 19, en la mezcla que contiene el mayor contenido de fibras, fuera de su rango elástico, la carga se incrementa ligeramente; teniendo como consecuencia que la velocidad de onda se incrementase ocasionando que la tendencia lineal se mantuviera.

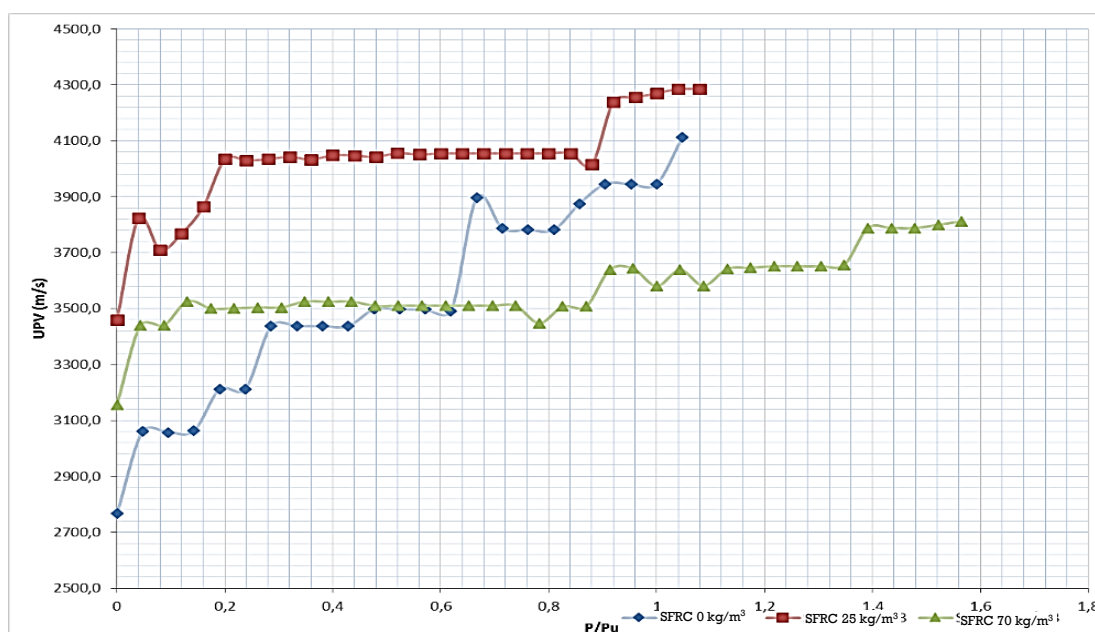
Si fuera posible configurar la medición de la velocidad de onda con respecto a la carga que se aplica en el elemento (el equipo Pund It no permite controlarse por carga), el comportamiento las gráficas hubiera dado con mejor exactitud, mejorando la precisión de las regresiones, sin embargo los coeficientes de correlaciones son muy cercanos a 0,90 que es una buena aproximación.

6.2.2 Medición UPV con respecto a parámetro P/Pu

Para comparar el comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la carga efectuada en la briqueta; se divide la carga en cada punto; por la carga máxima soportada por elemento al momento de presentar la primera fisura; para lo cual si se

observa Gráfica 20; es el punto máximo del rango elástico; es decir donde existe un cambio fuerte de la pendiente de la gráfica.

Para el caso; la carga última para la mezcla SFRC 0 kg/m³ es de 42 kN, SFRC 25 kg/m³ es de 50 kN y SFRC 70 kg/m³ es de 46 kN. Dividiendo cada parámetro de carga obtenido por la carga última se realiza la Gráfica 24; es notable que al igual que los anteriores parámetros medidos, a medida que se incrementa la carga, también se incrementa la velocidad de pulso ultrasónico.



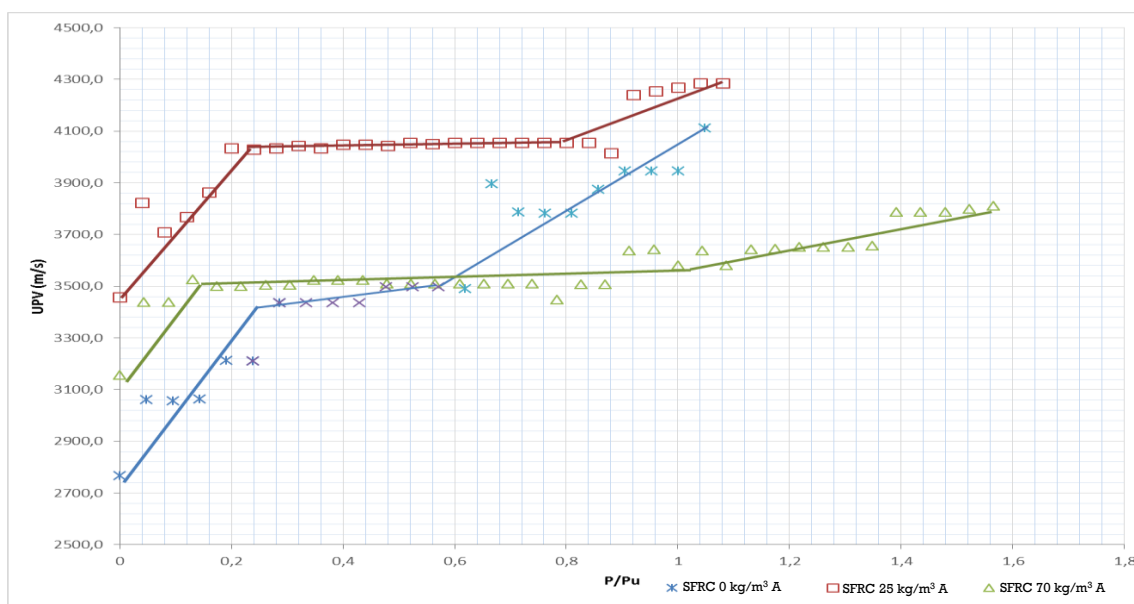
Gráfica 24. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a la carga. Fuente: El autor.

Se debe a que la velocidad de onda P aumenta a medida que el elemento reduce su porosidad al presentar flexión en el mismo.

Sin embargo y para un mejor entendimiento; es necesario identificar las diferentes pendientes de las gráficas y por lo tanto obtener tendencias; esto se muestra en la Gráfica 25; de la cual es inmediatamente visible encontrar tres tendencias.

En la primera parte al cargar el elemento la pendiente en los tres tipos de mezcla es muy similar y el aumento en la velocidad es totalmente lineal; esta tendencia se mantiene hasta cuando P/Pu es 0,2; de la misma manera se observa que la velocidad de onda es mayor en la mezcla SFRC 25 kg/m³ y menor en la mezcla SFRC 0 kg/m³ ratificando lo establecido en escritos anteriores.

Este comportamiento de similar pendiente inicial; se debe a que en esos instantes de carga; los elementos se encuentra en la mitad aproximada de su rango elástico y en ese instante las fibras de acero aún no han empezado a trabajar.



Gráfica 25. Linealización de la gráfica UPV vs P/Pu. Fuente: El autor.

A pesar de superar la relación $P/P_u = 0,2$; la velocidad del pulso se estabiliza y se incrementa ligeramente y de manera distinta para la tres mezclas; es decir en la mezcla con mayor contenido de fibras, se incrementó ligeramente hasta un valor de $P/P_u = 1,0$ aproximado; esto se debe a que el comportamiento de éste concreto es dúctil y por lo tanto tiene una mayor deformación (puede observarse la Gráfica 20) y el cierre de los espacios vacíos del elemento se da en un mayor rango de aplicación de la carga; es decir este comportamiento estable se da cuando el elemento empieza a presentar una amplia deformación sin fisuras.

En las mezclas SFRC 0 kg/m^3 el comportamiento se dio hasta un valor de $P/P_u = 0,5$ y en la mezcla SFRC 25 kg/m^3 en $P/P_u = 0,8$; esto se debe a que el elemento se deforma sin presentar fisuración. Y el último estado identificado es cuando el elemento empieza a presentar falla, en ese instante la velocidad de onda se incrementa hasta que presenta falla; para el caso de la mezcla SFRC 0 kg/m^3 esto es en un valor de $P/P_u = 1,0$; en la mezcla SFRC 25 kg/m^3 es para un valor de $P/P_u = 1,1$ y para la mezcla SFRC 70 kg/m^3

es para un valor de $P/P_u = 1,6$. Para la última mezcla este valor tan alto se debe al incremento sustancial en la absorción de energía y tenacidad de éste tipo de mezcla, por lo tanto la velocidad de onda se incrementa más ligeramente en la etapa final del mismo elemento. Comportamiento muy distinto para las otras mezclas; debido a que estas si se incrementaron fuertemente para el valor final de la carga.

6.3 Evaluación del daño:

Un parámetro importante es evaluar el daño en los elementos de concreto al someterlo a una carga, para lo cual es importante medir los módulos elásticos del material, uno en la zona del daño y el otro en la zona elástica del material sin presencia de fisuración, es decir el material con una aplicación ligera de la carga. Recordando lo propuesto por Lemaitre en su libro mecánica de sólidos capítulo 7 (Lemaitre, 2009) la medición del daño del elemento se puede medir con la Ecuación 33:

$$D_c = 1 - \tilde{E}/E$$

Ecuación 33

Donde \tilde{E} = Módulo elástico del material en su fractura y E = módulo elástico del material inicial. De la misma manera el daño es posible medirlo con la velocidad de onda, empleando la Ecuación 34.

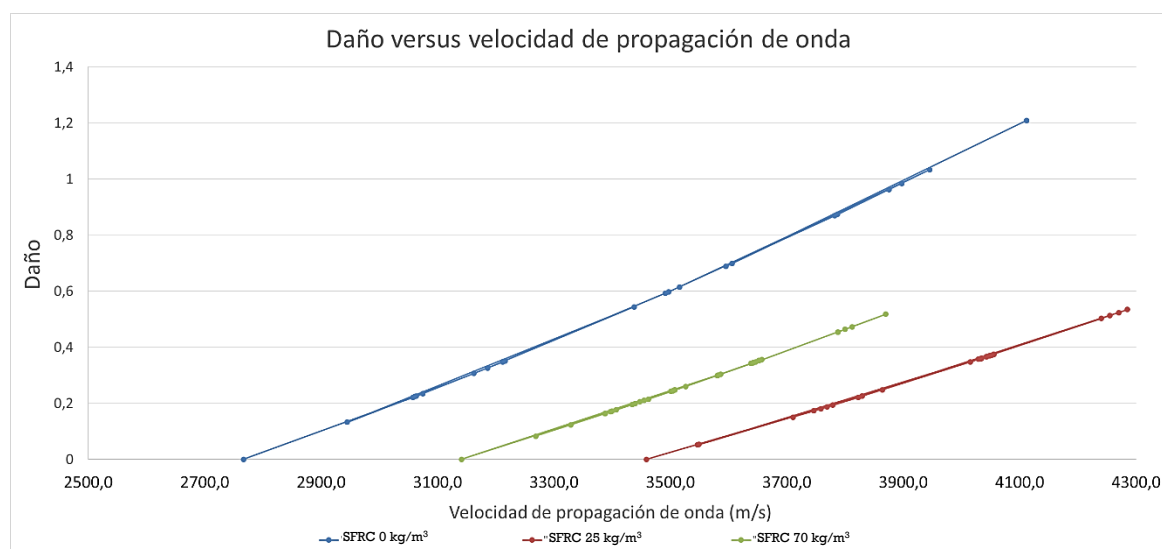
$$D_c = 1 - \tilde{V}_L^2/V_L^2$$

Ecuación 34

Donde \tilde{V}_L = Velocidad de onda en la fractura del elemento; V_L = Velocidad de propagación de la onda en el material sin daño. Con estos datos se buscará una correlación entre el daño del elemento y la velocidad de onda, para lo cual es necesario encontrar los módulos elásticos del material. Para esto se analiza la Gráfica 20; y la manera como se puede interpretar estos datos se dibuja en la Gráfica 26. Esto se basa en lo expuesto por Lemaitre (Lemaitre, 2009).

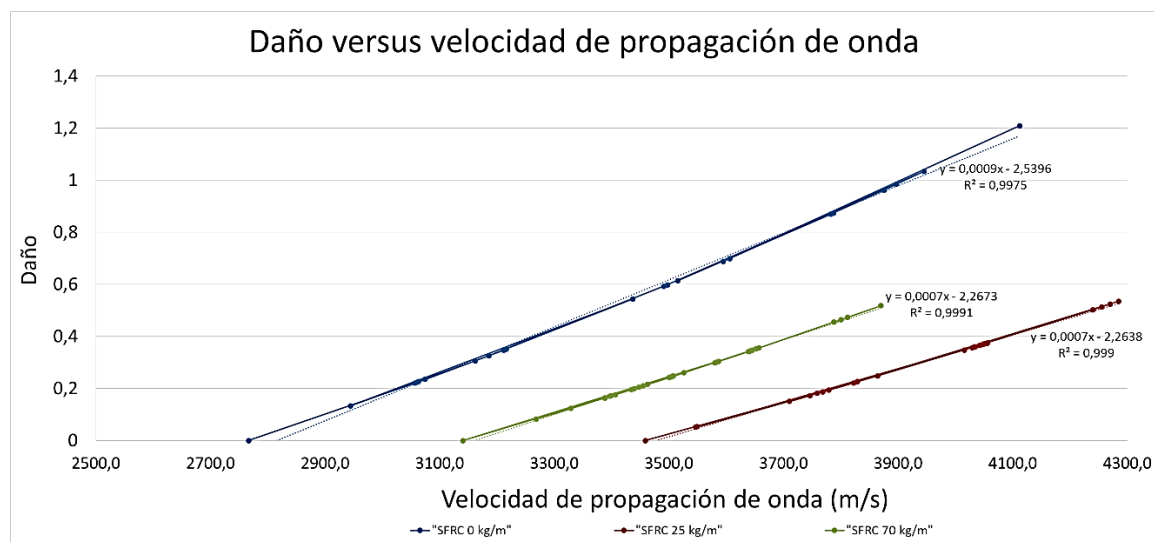
Empleando la Ecuación 34 se realiza la Gráfica 20, de la cual se observa el comportamiento que tiene la velocidad de onda, a medida que los elementos presentan daño y por lo tanto la tendencia, es por esto que a medida que se incrementa la velocidad de onda en un elemento sometido a flexión, aumenta el daño del mismo, comportamiento

esperado debido a que a medida que se incrementa el esfuerzo se aumenta la velocidad de onda.



Gráfica 26. Gráfica daño versus velocidad de propagación en m/s en las mezclas SFRC. Fuente: El autor.

Con la Gráfica 26 se nota un comportamiento lineal de la misma, por lo tanto se realiza una regresión lineal y se obtiene la Gráfica 27.



Gráfica 27. Regresiones lineales a los datos obtenidos de Daño versus velocidad de propagación. Fuente el autor.

De acuerdo a lo anterior se organizan los datos y se colocan en la Tabla 25. En las ecuaciones mostradas el valor de X es la velocidad de propagación de onda en m/s y Y es el daño ocasionado en el elemento.

Tabla 25. Ecuaciones obtenidas de la gráfica de daño versus velocidad de pulso ultrasónico. Fuente: El autor.

MEZCLA TIPO	Ecuaciones obtenidas (el resultado da en MPa)
SFRC 0 kg/m ³	$y = 0,0009x - 2,5396$ $R^2 = 0,9975$
SFRC 25 kg/m ³	$y = 0,0007x - 2,2673$ $R^2 = 0,9991$
SFRC 70 kg/m ³	$y = 0,0007x - 2,2638$ $R^2 = 0,999$

El daño de un elemento podría medirse empleando métodos no destructivos sobre una estructura de concreto y es posible correlacionar estos ensayos con ensayos destructivos siempre que la instrumentación se sincronice adecuadamente, obteniendo los datos que anteriormente se expusieron. Igualmente las fibras de acero permiten retrasar el daño de un elemento, lo cual comprueba que es muy útil reforzar un elemento de concreto con estas fibras pero de manera secundaria; ayudando a que el concreto tenga un mejor comportamiento y sea más predecible.

7 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y el análisis que se le ha dado a la información, a continuación se establecen las conclusiones.

1. Las fibras de acero tienen un comportamiento dúctil, por lo cual transmiten esta propiedad al concreto proporcionalmente a la cantidad de fibras, es decir entre mayor proporción de fibras se mejorará la ductilidad del concreto, sin embargo está ductilidad reduce la rigidez del mismo disminuyendo su resistencia a la compresión y aumentando la capacidad de deformación en el concreto.
2. Las fibras de acero como refuerzo secundario al concreto, tienen un excelente comportamiento; esto se demuestra al momento en el que falla el elemento, donde las fibras de acero cosen la fisura evitando que el elemento colapse de manera súbita y postergando su destrucción total; de esta manera aporta una resistencia post-fisuramiento que puede dar instantes de tiempo, antes que el mismo colapse.
3. Al tener un elemento más dúctil el módulo elástico del elemento se reduce, igualmente para obtener una mezcla con esta propiedad se requiere mayor cantidad de fibras; la mezcla SFRC 70 kg/m³ fue la que obtuvo los elementos más dúctiles, esto se puede concluir de acuerdo a los diagramas de esfuerzo versus deflexión, en los cuales las gráficas redujeron en su pendiente.
4. La principal utilidad de las fibras de acero es aumentar el módulo de ruptura del concreto para lo cual en la mezcla SFRC 25 kg/m³, aumentó la resistencia en un 24% con respecto a los elementos sin refuerzo, para las mezclas SFRC 70 kg/m³ aumenta 43%. Igualmente estos elementos permiten tener un concreto dúctil, es decir concretos que permiten tener deflexiones de dos o tres veces más que el concreto sin refuerzo.
5. El comportamiento a tensión del concreto fue muy similar al comportamiento a flexión; en este caso las fibras de acero aumentaron la resistencia a la tensión, en especial en la mezcla de 70 kg/m³, resultado esperado, debido a que las fibras de

acero trabajan a tensión y por lo tanto es el estado de esfuerzo que más resiste las mismas. En la mezcla con mayor cantidad de fibras duplicó la resistencia con respecto al concreto simple.

6. Todas las mezclas superaron los requisitos exigidos por la NSR 10 en cuanto a resistencia a compresión, tensión y flexión, se aclara que dicha norma no hace una referencia específica del concreto reforzado con fibras, sin embargo para los requisitos para concreto simple; con una adición de 25 kg/m^3 de fibras a la mezcla es sencillo cumplir con los requisitos de flexión y tensión del concreto.
7. Estos mismos efectos suceden con la tenacidad de los elementos; los que obtuvieron mejor capacidad de disipación de energía fueron los que tenían mezclas SFRC de 70 kg/m^3 ; teniendo unos valores de tenacidad 20 veces mayor a aquellos que no tenían refuerzo; haciendo de estos elementos más resistentes a cargas cíclicas y dinámicas.
8. Al ser los elementos SFRC con mayor resistencia a cargas cíclicas y dinámicas, son adecuadas para la fabricación de losas en vías vehiculares ó en estacionamiento de vehículos, permitiendo que estos elementos tengan mayor durabilidad, resistencia y menor daño.
9. Con respecto a la velocidad de pulso ultrasónico esta se propaga mejor y más rápido en medios más densos; esto se comprueba porque los elementos fabricados con SFRC 25 kg/m^3 fueron los que obtuvieron mayor registro en su velocidad de onda, que a su vez fueron los elementos que tuvieron mayor densidad.
10. La velocidad de pulso ultrasónico obtenida fue entre 2500 m/s hasta 3600 m/s en los diferentes tipos de mezclas sin cargar los elementos; al someterse los mismos a una carga, las velocidades de pulso ultrasónico fueron duplicadas aproximadamente; debido a que un elemento sometido a flexión aumenta su densidad al reducir los espacios vacíos del elemento y adicionalmente se reduce la distancia recorrida por la onda. Estos resultados son similares a lo obtenido en la investigación realizada por Bogas y Gómez (Bogas, Gómez, & Gómez, 2013).

11. Igualmente las fibras de acero influyen en la transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico; es decir debido a que las fibras ocasionan que el elemento tenga un comportamiento dúctil, la transmisión de la velocidad de pulso ultrasónico varía considerablemente haciendo que las gráficas de esfuerzos vs. UPV tengan dos o tres cambios de pendiente dependiendo de la cantidad de fibras en los elementos ensayados. Lo que establece que la velocidad de pulso varía y aumenta en los rangos plásticos de un material.
12. Con respecto al daño de los elementos; los que mejor soportaron fueron los elementos fibro-reforzados y como era de esperarse el que mejor soportó el daño fue el elemento con mayor cantidad de fibras de acero, sin embargo los elementos con SFRC 25 kg/m³ tuvieron una capacidad frente al daño muy similar a los elementos de SFRC 70 kg/m³; por lo tanto una mezcla SFRC 25 kg/m³ es la dosificación más adecuada para reforzar el concreto, este planteamiento se afirma con la resistencia a la flexión y tensión obtenidas para estas mezclas.
13. Las ecuaciones determinadas para evaluar el daño de una estructura son una primera afirmación y permitirán evaluar aproximadamente el daño de una estructura de concreto, con la finalidad de conocer si elemento se encuentra con un daño menor a 0,5; es un elemento que probablemente no va a colapsar, sin embargo si el daño es superior a 0,5 se encuentra con una probabilidad de que la estructura colapse.
14. Estas ecuaciones pueden usarse en una losa vial, en la cual a medir la UPV permitirá ser una primera aproximación del daño en el elemento, por lo tanto se podrá predecir en qué estado se encuentra y que nivel de deterioro tendrá.

8 RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos realizados con temáticas similares a este trabajo el autor se permite realizar las siguientes recomendaciones.

1. Buscar una configuración en la cual permita que los equipos de medición de la velocidad ultrasónica se sincronicen con la carga o la medición de la deformación del elemento para tener una lectura más simultánea.
2. Para mezclas SFRC es vital el empleo de un super-plástificante, debido a que las fibras vuelven la mezcla de concreto muy dura perdiendo la manejabilidad de la misma; para evitar la generación de espacios vacíos se recomienda emplear un super-plástificante tal y cómo se hizo en éste trabajo.
3. El contacto entre los palpadores y los elementos en concreto debe hacerse con la misma fuerza para obtener datos similares en todas las mediciones; es por esto que cobra importancia el diseño de equipos de sujeción que complementen estos equipos y con esto la medición es más confiable.
4. No se recomienda el uso de equipos de compactación mecánica en mezclas SFRC, estos causan segregación de las fibras.

9 BIBLIOGRAFÍA

- ACI 544. (s.f.). *Consideraciones para el Diseño de Concreto Reforzado con Fibras ACI 544*. Instituto Americano del Concreto.
- Ali R. Khalo, N. K. (s.f.). Propiedades mecánicas de concretos de normal a alta resistencia .
- Almansa Moreno, E., & Cánovas Manuel, F. (1997). Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero. *Materiales de Construcción* , 248.
- American Concrete Institute. (1999). *ACI 544.4 R-88 Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute .
- American Concrete Institute. (2001). *Guía para la Durabilidad del Hormigón*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (s.f.). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1)*. American Concrete Institute.
- American Standard Testing and Materials. (2004). *Standard Specification for Steel Fibers for fiber-reinforced Concrete*. West Conshohocken: ASTM.
- American Standard Testing and Materials International. (2006). *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber - Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) ASTM-C-1609*. West Conshohocken: ASTM.
- ARGOS. (2010). *Tecnología del Concreto y sus Componentes*. Bogotá: ASOCRETO.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10*. Bogotá-Colombia: AIS.
- ASTM (American Standard Testing and materials). (1997). *ASTM - C - 1018 Standard Toughness and First-Carck Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken: ASTM.
- Bernard, E. S., & Xu, G. G. (2007). Statistical Distribution of Fiber-Reinforced Concrete Beam Test Data. *Journal of ASTM international*, 120 p.
- Bogas, J. A., Gómez, M. G., & Gómez, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural light weight Concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Science Direct*, 11.
- Carcaño, R. G. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería Revista Académica*, , 41-52.

-
- Ding, Y., & Wolfgang, K. (1999). Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests. *Cement and Concrete Research*, 1834.
- Guan, X., Liu, X., Jia, X., Yuan, Y., Cui, J., & Mang, H. (2015). A stochastic multiscale model for predicting mechanical properties of fiber reinforced concrete. *International Journal of Solids and Structures*, 280 - 289.
- Guzman, D. S. (2001). *Tecnología del Concreto*. Bogotá D.C.: Bhandar editores.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación . (1992). *NTC 396 Determinación del asentamiento del Concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2000). *NTC 722 Determinación de la Resistencia a la Tensión Indirecta del Concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2010). *Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC. (2000). *Especificaciones de los Agregados para el Concreto*. Bogotá-Colombia: ICONTEC.
- Instituto Torroja. (04 de 11 de 2014). *Causas del Daño en el Concreto*. Obtenido de Instituto Torroja: <https://www.youtube.com/watch?v=rif15KMSYEs>
- Intituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1995). *NTC 1926 Determinación de la masa unitaria del Concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- Jianming, G., Sun, W., & Morino, K. (1997). Mechanical Properties of Steel Fiber-reinforced, High-strength, Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 313.
- Karadelis, J., & Lin, Y. (2015). Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. *Construction and building materials*, 498 - 505.
- Köksal, F., Altun, F., Yigit, I., & Sahin, Y. (2008). Efecto combinado del Humo de Silice y la Fibra de Acero en las propiedades mecánicas de Concretos de alta resistencia. *Construction and building materials*, 7.
- Kumutha, R., & Vijai, K. (2009). Effect of Steel Fibers on the Propierties of Concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 537.
- L., G. A. (2006). *Concreto Simple*. Popayán: Universidad del Valle.
- Lemaitre, J. (2009). *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge: Cambridge University .
- Marco, D. p., Plizzari, G., & Lucie, V. (2009). Fibre reinforced Concrete: New Design Perspective. *Materials and Structures*, 1281.

-
- MÁRMOL SALAZAR, P. C. (2010). *Hormigones con Fibras de Acero Características Mecánicas*. Bogotá: Universidad Politécnica de Madrid.
- Monteiro, P. K. (2006). *Concrete Microstructure, properties, and materials*. California: Department of Civil and Environmental Engineering.
- NEVILLE, A. (1999). *Tecnología del Concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Neville, A. M. (2010). *Concrete Technology*. London: Pearson.
- P. Paultre, M. A. (2010). Behavior of Steel Fiber-reinforced High- Strength Concrete Columns under Uniaxial Compression. *Journal os Structural Engineering*, 12.
- P., P., M., A., R., E., Y., L., & Y., L. (2010). Behavior of Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete Columns under Uniaxial Compression. *Journal of Structural Engineering (OCTOBER)*, 1250.
- Prisco, M. D., & Vandewalle, G. P. (2009). *Concrerto Reforzado con Fibras; Nuevas Perpectivas*. Materials and Structure.
- PROCEQ SA. (2013). *Operating Instructions Pundit Lab*. Schwerzenbach: Proceq SA.
- QUINTERO ORTÍZ, L. A. (2011). RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA POROSIDAD DEL CONCRETO EVALUADA A PARTIR DE PARÁMETROS ULTRASÓNICOS. *Revista ION*, 69-76.
- Sanchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana - facultad de Ingeniería.
- SIKA. (01 de 2012). Sikafiber FE-530/35 GH. Tocancipa, Cundinamarca, Colombia: Sika r.
- Song, P., & Hwang, S. (2004). Mechanical propierties of high.strength steel fiber-reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, 673.

10 APÉNDICES



SOLICITUD:	Estudiante maestría	CÓDIGO DE INFORME:	Repetibilidad
MUESTRA:	Cemento Portland T1	FECHA DE RECIBO:	2014-11-04
FUENTE:	Cemento Cemex	FECHA DE ENSAYO:	2014-11-04
UBICACIÓN:	Desconocida	FECHA DE INFORME:	2014-06-12

Prueba N°	Variable	unidades	01	02
Lectura inicial	Lo	ml= cm ³	0,4	0,3
Peso del cemento	M	g	64,00	64,00
Lectura Final	Lf	ml	22,0	22,7
Temperatura		°C	23,0	23,0
Densidad = M/(Lf-Lo)	ρ	g/cm ³	2,96	2,86
Promedio Densidad	ρ	g/cm ³	2,91	
Densidad relativa ρ /densidad agua(4°C)		g/cm ³	2,91	

OBSERVACIONES:	Ninguna
----------------	---------

Elaboró:

Firma:

Nombre: Miguel Ángel Ospina García

Cargo: Estudiante de la Maestría

Revisó y Aprobó

Firma:

Nombre: Juan Manuel Lizarazo

Cargo: Director del proyecto de grado



SOLICITUD:	Estudio de agregados para trabajo de grado	CÓDIGO DE INFORME:	No aplica
MUESTRA	Grava de canto Rodado	FECHA DE RECIBO:	2014-10-23
FUENTE:	Deposito en Villaviciencio	FECHA DE ENSAYO:	2014-10-30
UBICACIÓN:	Villaviciencio	FECHA DE INFORME:	2014-10-30

	Variable	Unidades			
PRUEBA No.	-	-	01	02	03
Tamaño Maximo Nominal	-	mm	25,0	25,0	25,0

CALIBRACIÓN MOLDE

Molde No.	-	-	UMNG-AC-0031	UMNG-AC-0031	UMNG-AC-0031
Masa del Molde	T	kg	9,15	9,15	9,15
Masa del Molde + agua	-	kg	23,95	23,95	23,95
Masa del agua	-	kg	14,80	14,80	14,80
Temperatura del agua	-	°C	18,2	18,2	18,2
Densidad del agua corregida por temperatura (ver norma)	-	kg/m ³	998,52	998,52	998,52
Volúmen corregido por temperatura	V	m ³	0,0148	0,0148	0,0148

PROCEDIMIENTO

Apisonamiento



Golpeteo



Paleo (Masa unitaria)



Masa del Agregado + molde	G	kg/m ³	32,55	32,85	32,70
Masa Unitaria del molde (G-T)/V	M	kg	1578,74	1598,98	1588,86
% de absorción (NTC 176/237)	A	%	2,1000	2,1000	2,1000
Masa unitaria en SSS= M(1+(A/100))	Msss	kg/m ³	1611,895	1632,561	1622,228
Gravedad específica base seca (nominal) (NTC176/237)	S	-	2,690	2,690	2,690
Densidad del agua (998 kg/m3)	W	kg/m ³	998	998	998
% de Vacíos= 100((S*W)-M)/(S*W)	-	%	41	40	41

OBSERVACIONES:

Ninguna

Elaboró:

Firma:

Nombre: MIGUEL ÁNGEL OSPINA GARCÍA

Cargo: Estudiante de la maestria en construcción

Revisó y Aprobó:

Firma:

Nombre: JUAN MANUEL LIZARAZO

Cargo: Director del trabajo de grado



SOLICITUD:	Estudio de agregados para trabajo de grado	CÓDIGO DE INFORME:	No aplica
MUESTRA	Arena café claro	FECHA DE RECIBO:	2014-10-23
FUENTE:	Deposito en Villaviciencio	FECHA DE ENSAYO:	2014-10-30
UBICACIÓN:	Villaviciencio	FECHA DE INFORME:	2014-10-30

	Variable	Unidades			
PRUEBA No.	-	-	01	02	03
Tamaño Maximo Nominal	-	mm	4,8	4,8	4,8

CALIBRACIÓN MOLDE

Molde No.	-	-	UMNG-AC-0048	UMNG-AC-0048	UMNG-AC-0048
Masa del Molde	T	kg	5,10	5,10	5,10
Masa del Molde + agua	-	kg	8,10	8,10	8,10
Masa del agua	-	kg	3,00	3,00	3,00
Temperatura del agua	-	°C	19,2	19,2	19,2
Densidad del agua corregida por temperatura (ver norma)	-	kg/m ³	998,33	998,33	998,33
Volúmen corregido por temperatura	V	m ³	0,0030	0,0030	0,0030

PROCEDIMIENTO

Apisonamiento

☒

Golpeteo

☐

Paleo (Masa unitaria)

☐

Masa del Agregado + molde	G	kg/m ³	9,70	9,75	9,75
Masa Unitaria del molde (G-T)/V	M	kg	1530,77	1547,41	1547,41
% de absorción (NTC 176/237)	A	%	2,1000	2,0000	2,1000
Masa unitaria en SSS= M(1+(A/100))	Msss	kg/m ³	1562,917	1578,357	1579,905
Gravedad específica base seca (nominal) (NTC176/237)	S	-	2,650	2,650	2,650
Densidad del agua (998 kg/m3)	W	kg/m ³	998	998	998
% de Vacíos= 100((S*W)-M)/(S*W)	-	%	42	41	41

OBSERVACIONES:

Ninguna

Elaboró:

Firma:

Nombre: MIGUEL ÁNGEL OSPINA GARCÍA

Cargo: Estudiante MAeC

Revisó y Aprobó:

Firma:

Nombre: JUAN MANUEL LIZARAZO

Cargo: Director del trabajo de grado